



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Nuevas técnicas de análisis en modelización analógica: Interpretación de volúmenes sísmicos obtenidos a partir de secciones de modelos experimentales.

Trabajo realizado por:

Johana Andrea Botero Tautiva

Dirigido por:

Oriol Ferrer

Codirigido por:

Maria Roma

Grado en:

Ingeniería geológica

Barcelona, 23 de Junio 2016

Departament de Dinàmica de la Terra i l'Oceà

TRABAJO FINAL DE GRADO

Resumen

La modelización analógica tiene actualmente un gran auge como herramienta para la comprensión de procesos geológicos complejos. Este proyecto presenta una nueva técnica de interpretación de los resultados obtenidos a partir de dos modelos analógicos, modelos generados gracias a un cubo de cristal con una pared móvil y tres fijas, una cuña de madera actuando como falla de basamento y como materiales deformables arena y silicona esta última actuando como capa salina con comportamiento dúctil. El primero de los modelos ha sido deformado por extensión y el segundo modelo ha sido deformado con extensión e inversión. El objetivo principal de estos modelos es ver cómo actúa un nivel salino en un contexto extensivo e inversivo, para ello se hace un seguimiento continuo de la deformación mediante un registro fotográfico. A partir de las imágenes obtenidas se ha llevado a cabo una modelización del estadio final de la deformación con el programa Petrel de Schlumberger. El resultado es un cubo 3D, con diferentes zonas que representan la deformación en tres estadios diferenciados, en primer lugar el estadio pre-cinemático, el estadio sin-cinemático y el estadio post-cinemático de la deformación. Permitiendo una interpretación más clara de las estructuras que se han generado y de la interacción entre las mismas.

ÍNDICE

Resumen.....	1
ÍNDICE	2
1. Introducción.....	3
1.1 Motivaciones.....	3
1.2 Objetivos.....	3
2. Metodología y flujo de trabajo.....	4
3. Fallas extensivas e Inversión tectónica	5
3.1 Fallas extensivas	5
3.2 Inversión tectónica	10
3.3 Tectónica salina.....	12
4. Introducción a los modelos analógicos	16
4.1 Modelos analógicos	16
5. Modelización analógica	17
5.2 Modelo 1 (Experimento Ex_04)	22
5.3 Modelo 2 (Experimento Ex_03)	25
5.4 Procesado de los datos analógicos	26
5.5 Limitaciones experimentales.....	27
5.6 Construcción e interpretación del volumen sísmico a partir de secciones analógicas	28
5.7 Limitaciones de la modelización.....	35
6. Resultados experimentales e interpretación.....	36
6.1 Extensión	36
6.2 Compresión.....	42
7. Casos reales	50
7.1 Ejemplos reales con extensión	50
7.2 Ejemplos reales con extensión e inversión.....	53
8. Discusión y conclusiones.....	54
9. Agradecimientos.....	56
10. Referencias bibliográficas	57

1. Introducción

1.1 Motivaciones

Las motivaciones principales para llevar a cabo este proyecto de final de grado han sido dobles: en primer lugar profundizar en el mundo de la modelización geológica estructural mediante experimentos analógicos y su posible aplicación en geofísica, y en segundo lugar la implementación de los modelos analógicos en el sector petrolero al que aspiro a formar parte.

1.2 Objetivos

Los objetivos de este proyecto pueden separarse en dos grandes grupos siendo generales y metodológicos. Entre los generales se incluyen en primer lugar obtener un modelo geológico 3D a partir de resultados experimentales (modelos analógicos realizados en el laboratorio). En segundo lugar, utilizar los resultados de la modelización geológica 3D para ayudar en la interpretación de datos sísmicos en zonas con presencia de niveles salinos. En general la presencia de evaporitas dificulta la imagen sísmica generando zonas de sombra debajo de los cuerpos salinos por absorción de la energía de las ondas sísmicas por parte de la sal. Este hecho dificulta enormemente la interpretación de las estructuras geológicas o posibles trampas petroleras cuando la calidad de los datos sísmicos no es buena (mayor calidad implica una mayor inversión económica por parte de las compañías). En resumen, este trabajo pretende demostrar como los modelos analógicos (modelos de arena) constituyen una poderosa herramienta que permite mejorar la interpretación geológica de los casos naturales.

Además existen una serie de objetivos metodológicos relacionados con el aprendizaje y perfeccionamiento de las diferentes técnicas utilizadas durante la realización del trabajo (modelización analógica, interpretación sísmica 2D/3D y modelización geológica 3D) y que en parte fueron introducidas durante los cursos del grado de ingeniería geológica.

2. Metodología y flujo de trabajo

En este apartado se describen los pasos seguidos para la realización de este proyecto, tales como la búsqueda bibliográfica, la realización de los experimentos 03 y 04, la obtención de los resultados de la modelización analógica y la posterior introducción de estos datos en el programario Petrel para poder realizar el modelo 3D del cubo.

Una vez finalizada la obtención del modelo 3D, el paso siguiente fue la búsqueda de casos análogos reales que validan la consistencia y la utilidad de los resultados obtenidos, y para concluir se redactó la memoria del proyecto con los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas (Figura 1).



Figura 1: Diagrama de flujo de trabajo seguido para la realización del proyecto.

3. Fallas extensivas e Inversión tectónica

En este apartado del trabajo se introducirán diversos conceptos de geología estructural que han sido ampliamente utilizados en la elaboración de esta memoria. Estos conceptos están básicamente relacionados con fallas extensivas e inversión tectónica que fueron los procesos de deformación que se aplicaron en los modelos analógicos.

3.1 Fallas extensivas

Una falla es - una fractura en un estrato de la corteza terrestre debido a esfuerzos verticales u horizontales que producen el desplazamiento relativo entre dos bloques contiguos a partir del plano de falla que es donde se lleva a cabo el desplazamiento (Anderson, 1951 y McClay, 1988)

Entre los diferentes tipos de falla se encuentran las fallas extensivas o normales que se desarrollan bajo la influencia de esfuerzos extensivos, con el σ_3 en la horizontal y σ_1 en la vertical. En términos simples, el desplazamiento sobre el plano de falla, es conforme a la pendiente del mismo obedeciendo a la fuerza de la gravedad (Anderson, 1951).

Las fallas normales o extensivas se desarrollan en gran variedad de contextos tectónicos. Se forman en todos los límites de placas (Tabla. 1). Dentro de cada uno de estos contextos se pueden distinguir entre aquellas fallas extensivas que afectan a una parte significativa de la litosfera (Rift continental) o aquellas que solo afectan a la parte más superficial (ej. niveles de despegue salinos y diapiros) (McClay, 1997).

LÍMITES DE PLACA DIVERGENTES	DORSALES	Dorsal atlántica
	SISTEMAS DE RIFT CONTINENTAL	Rift africano oriental
LÍMITES DE PLACA CONVERGENTES	ZONAS DE SUBDUCCION <ul style="list-style-type: none">• Cuencas marginales en corteza oceánica• Cuencas de tras-arco(corteza continental)	Cuenca de Fiji Cuenca de Bransfield

	OROGENOS DE COLISION <ul style="list-style-type: none"> • Cuencas de colapso intraorogénicas • Sistemas extensivos de expulsión lateral • Cuencas extensivas por flexión 	Cuenca panónica Tíbet Cuencas de antepaís
LIMITES DE PLACA TRANSCURRENTES	CUENCAS DE PULL APART	Cuenca de Ventura
INTRAPLACA	SISTEMAS DE RIFT CONTINENTALES MARGENES PASIVOS ZONAS CALIENTES	Sistema del Rhin Margen Atlántico Basin and Range

Tabla. 1. Contextos tectónicos donde se desarrollan sistemas de fallas extensivas (McClay, 1997)

La evolución de un límite divergente se inicia con el desarrollo de un rift continental, hasta la formación de corteza oceánica (dorsal oceánica) y con el desplazamiento pasivo de los márgenes continentales adelgazados. Al someter la litosfera a un estiramiento (formación de un rift continental), la parte superficial de la corteza se deforma mediante el desarrollo de fallas extensivas.

Clasificación geométrica de las fallas extensivas:

Según Wernicke y Burchfield (1982) y Gibbs (1984) las fallas normales se pueden clasificar a partir de su geometría 2D en:

- No rotacional

Este tipo de fallas tienen una geometría planar, las fallas y las capas no experimentan ninguna rotación y dan lugar a geometrías en forma de horst y graben.

Dependiendo del tipo de rotura se pueden identificar dos tipos, las planares y las planares tipo kink, estas últimas presentan cambios bruscos de buzamiento, tal y como muestra la figura 2.

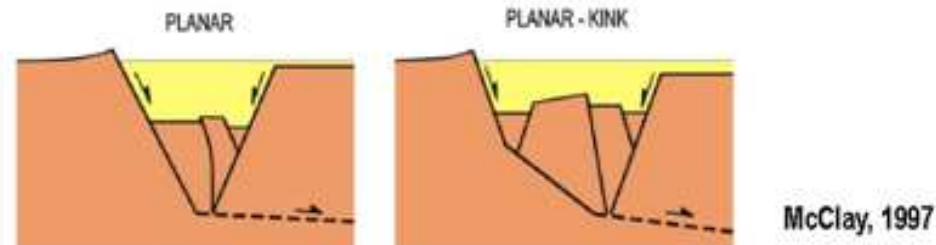


Figura 2: Tipos de fallas no rotacionales: planares (izquierda) y planares tipo kink (derecha) que presentan un cambio brusco de buzamiento (Mcclay 1997).

- Rotacional

Este tipo de fallas pueden clasificarse en aquellas en las que las fallas y las capas experimentan rotación y aquellas en las que las capas son las únicas que sufren una rotación.

1. Fallas extensivas rotacionales planares

Se denominan también fallas dominó. Si los bloques separados entre las fallas permanecen rígidos e indeformados durante la extensión se denominan planares rotacionales (figura 3, izquierda). Si estos se deforman durante la extensión y toman una forma sigmoidal se denominan fallas en dominó sigmoidales (figura 3, derecha).

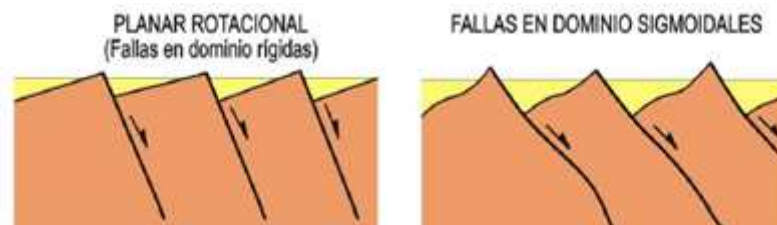


Figura 3: Tipos de fallas extensivas rotacionales: planares rotacionales (izquierda) y fallas en dominó sigmoidales (derecha). Ver explicaciones en el texto (McClay, 1997)..

2. Fallas extensivas rotacionales lítricas

Este tipo de fallas presentan un buzamiento variable a lo largo del plano de falla lo que conlleva una rotación de las capas por su adaptación a la geometría del plano de falla durante el desplazamiento del bloque superior.

Las fallas lítricas son mayoritariamente cóncavas hacia arriba dado que las fallas tienden a horizontalizarse en profundidad debido a la disposición horizontal de las discontinuidades mecánicas o los despegues.

Sin embargo, en ocasiones estas fallas pueden mostrar geometrías lítricas convexas que nos indican una rotación de las capas en sentido opuesto al de las fallas lítricas cóncavas tal y como muestra la figura 4.

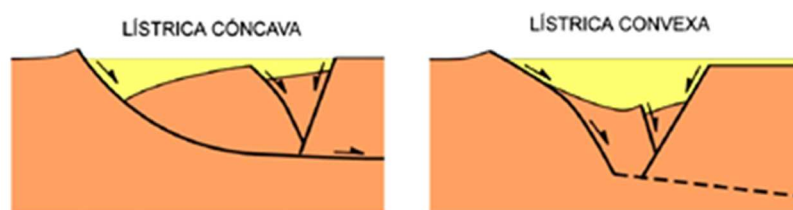


Figura 4: Tipos de fallas extensivas rotacionales lítricas, (Mc Clay 1997).

Tal y como se puede apreciar en los materiales amarillo de las figuras 2, 3 y 4, la geometría de la falla extensiva controla a su vez la forma de los materiales que se depositan en su bloque superior durante el proceso extensivo (materiales sin-extensivos, sinrift o sin-cinemáticos). Cuando las fallas planares no son rotacionales las capas de los materiales sin-extensivos depositados en el bloque superior de la falla (en donde se desarrolla la cuenca sedimentaria) mostrarán un buzamiento constante, teniendo una geometría tabular con bases y techos paralelos, manteniendo por tanto su grosor (potencia) a lo largo de la cuenca tal y como muestra la figura 5.

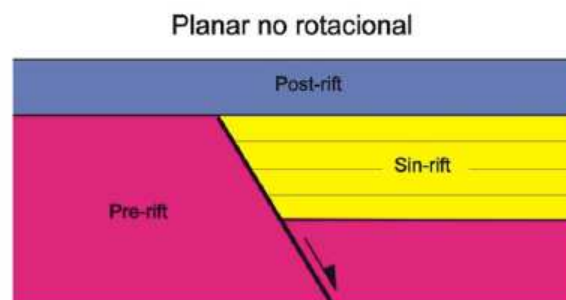


Figura 5: Falla planar no rotacional mostrando la relación de los materiales sin-extensivos (en amarillo) sedimentados durante el movimiento de la falla (McClay, 1997). Al no existir rotación del bloque superior estos presentan un buzamiento constante, manteniendo la potencia del estrato.

En el caso de fallas rotacionales planares, las capas sin-extensivas presentarán una geometría en cuña con un cambio progresivo del buzamiento desde las capas más antiguas a las más modernas tal y como se puede apreciar en la figura 6. Además, los materiales sin-extensivos (en amarillo en la figura 6) se engrosan progresivamente hacia el plano de falla y se adelgazan a medida que se alejan de él para cada uno de los bloques de falla.

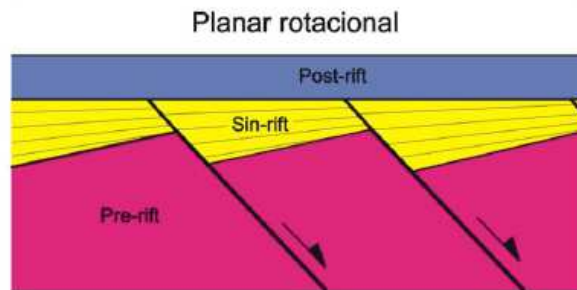


Figura 6: Falla planar rotacional mostrando la relación de los materiales sin-extensivos que cambian de buzamiento a lo largo de la unidad y se engrosan hacia la falla (McClay, 1997).

Finalmente, si las fallas son rotacionales lítricas, las capas sin-extensivas mostrarán también una forma en cuña como en el caso de las fallas rotacionales planares, pero a diferencia de éstas, el buzamiento para una superficie de capa sin-extensiva determinada no será constante sino que decrecerá progresivamente al alejarse de la falla tal y como muestra la figura 7. Esta geometría se conoce como rollover.

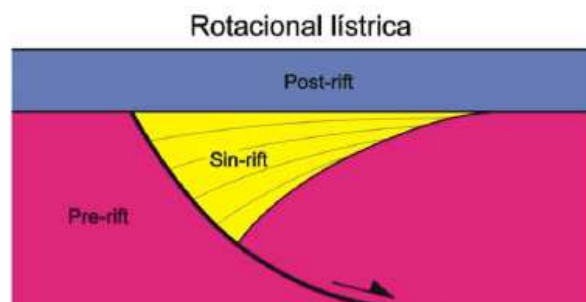


Figura 7: Fallas rotacionales lítricas mostrando como el buzamiento de la capa sin-extensiva (en amarillo) no es constante sino que decrece progresivamente al alejarse del plano falla formando un rollover en su bloque superior (McClay, 1997).

3.2 Inversión tectónica

El concepto de inversión tectónica o inversión estructural ha sido muy estudiado por su gran importancia en la industria petrolera, ya que generalmente las estructuras resultantes actúan como trampas de hidrocarburos. Este concepto fue definido por Bally (1981) y Cooper et al. (1989) para hacer referencia a la reactivación de una falla extensiva por esfuerzos compresivos. Se diferencian dos grandes tipos de inversión tectónica (Cooper y Williams, 1989): por un lado la “Inversión positiva” que se refiere a la inversión de una cuenca extensiva cuando posteriormente es sometida a deformación contractiva (figura 8), y por otro lado la “inversión negativa” que describe la reactivación extensiva de estructuras compresivas. En lo que al presente trabajo, nos centraremos en la inversión tectónica positiva, ya que la negativa es menos común y queda fuera del alcance del estudio.

Tal y como se ha comentado anteriormente, en la inversión tectónica positiva, la cuenca extensiva pre-existente es sometida a esfuerzos compresivos, por lo que en general este tipo de inversión será importante durante los primeros estadios de deformación de muchos cinturones orogénicos. Es aquí donde inicialmente las fallas extensivas principales de la cuenca son invertidas contraccionalmente controlando el plegamiento y el levantamiento de la cuenca extensiva pre-existente (figura 8). En los casos más extremos, estas cuencas pueden llegar a ser incorporadas totalmente dentro del sistema de fajas plegadas y cabalgamientos que constituyen el orógeno (McClay, 1999).

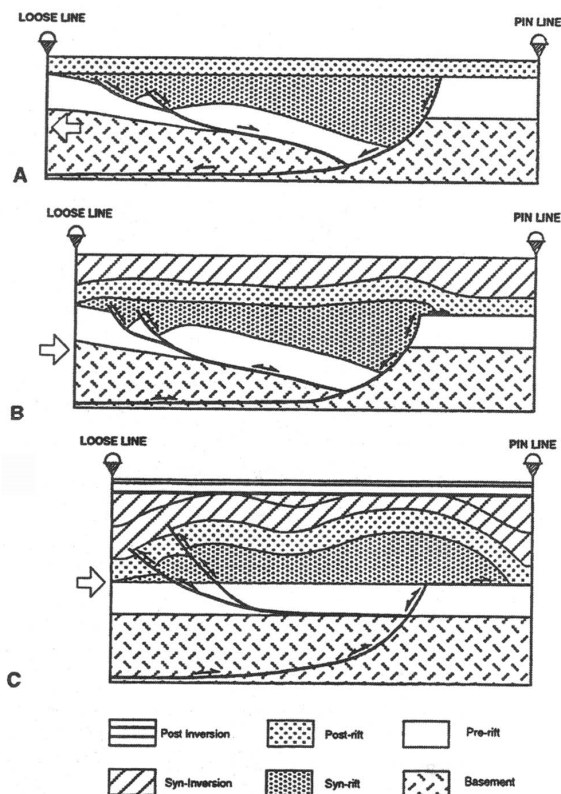


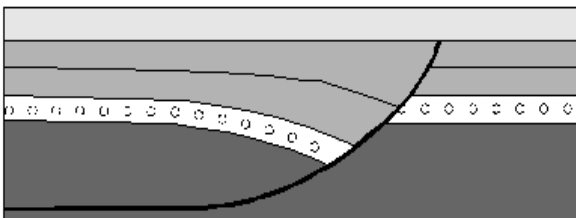
Figura 8: Inversión positiva de un semi graben desde el final de la etapa extensiva (A) y a través de los diferentes estadios de inversión (B) hasta producirse la inversión total de la cuenca (C) recuperando el estadio previo a la extensión para los materiales pre-extensivos (pre-rift en la imagen) Estructura de arpón. (Bally, 1984).

Para el reconocimiento de la inversión tectónica, tanto para inversión positiva como negativa se utiliza el concepto de elevación regional (McClay, 1999). El nivel regional es aquel nivel previo a la deformación, en este caso a la inversión (post-rift). Cuando se genera una elevación topográfica por encima de este nivel, si se observa elevación regional (mediante cabalgamientos, antifórmas en arpón, pop-ups, etc.) de los materiales sin-rift, se puede afirmar que se ha producido inversión tectónica.

Para conocer la deformación que ha sufrido el terreno se deben tener en cuenta las secuencias pre-, sin- y post-extendidas. Estas secuencias tienen una función muy importante en el estudio de la cronología de la deformación, ya que una vez conocido el tipo de secuencia estratigráfica se puede deducir como se ha llevado a cabo esta deformación. Además, una vez se ha determinado el movimiento relativo que se han producido en los estratos entre el bloque superior e inferior de la falla invertida, se puede determinar la cantidad total de inversión. Para ello es importante el concepto de punto nulo (Gibbs, 1987). Tal y como muestran las figuras 9, 10 y 11, el punto nulo es aquel punto situado a lo largo del plano de falla a través del cual las capas no muestran ningún desplazamiento. A partir de este elemento respecto a la serie sin-extendida se puede definir la cantidad de inversión que se ha producido en una falla.

Así la inversión de un semi graben con un 'rollover' asociado en el bloque superior de la falla pasa por diferentes estadios evolutivos que se muestran en las figuras 9, 10 y 11. Durante las primeras etapas de inversión, el semi graben (*half-graben* en inglés) mostraría una inversión suave a moderada en función de la situación de su punto nulo (figura 9 y 10). Si la inversión continua se entra en la ventana de la inversión fuerte cuando prácticamente todo el movimiento extensivo de la falla normal previa se ha recuperado (figura 10). Finalmente se alcanza la inversión total de la cuenca cuando se recupera la regional previa a la extensión para las capas pre-extendidas (en blanco y con puntos en la imagen) (figura 11). A partir de este punto y si la compresión continua se sale de la inversión tectónica y se entra en los sistemas contractivos con el desarrollo de cinturones de pliegues y cabalgamientos.

Half-Graben



Inversión suave

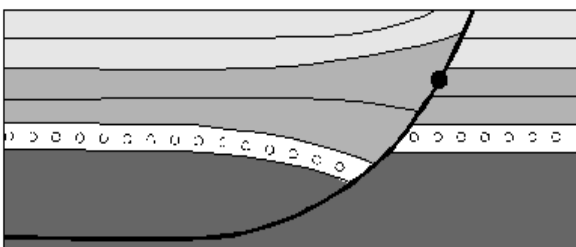
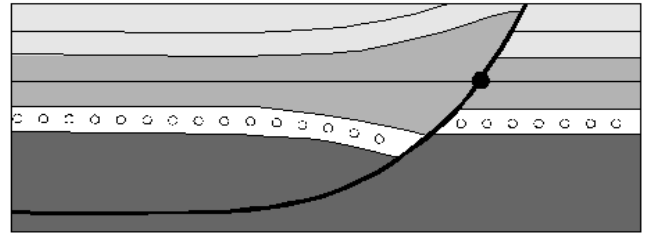


Figura 9: Half-graben resultante de una extensión con un desplazamiento relativo entre capas describiendo una falla normal.

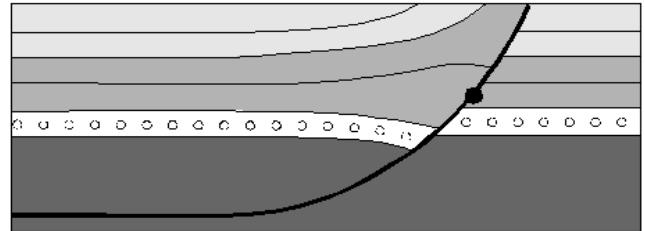
Durante los primeros estadios de inversión, se reactiva la falla contractivamente provocando el levantamiento temprano de la cuenca extensiva en forma de cuña y en gris claro en la figura (Cooper et al., 1989).

Figura 10: Estadio medio de la inversión, en el que el movimiento inverso es más pronunciado, siendo posible conocer la cantidad de movimiento gracias a la posición del punto nulo. En la inversión moderada se puede ver como se unen dos estratos equivalentes sin-extensivos a ambos bloques de la falla (Cooper et al., 1989).

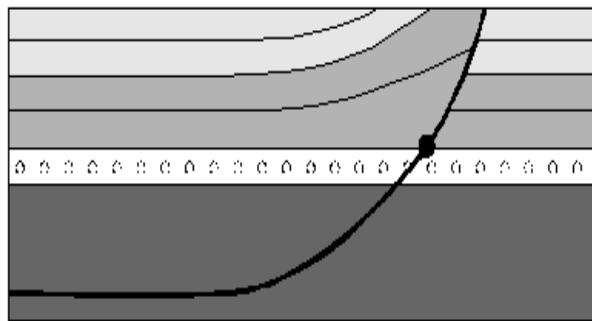
Inversión moderada



Inversión fuerte



Inversión total



● Punto nulo

Figura 11: Inversión total de una cuenca extensiva. Los materiales pre-extensivos (estrato blanco con círculos) vuelven a su posición original (previa deformación extensiva) después de haber bajado (extensión) y subido (inversión) por el plano de la falla.

3.3 Tectónica salina

En este apartado del trabajo se introducirán diversos conceptos relacionados con la tectónica salina, Estos conceptos son básicamente el flujo de sal, el diapirismo y las secuencias halocinéticas. Todos ellos han sido ampliamente utilizados en la elaboración de esta memoria.

Se ha hecho una revisión de la literatura más conocida sobre la tectónica salina, revisando autores como Giles, Rowan , Jackson , Lawton y Hudec entre otros.

Este apartado pretende ser una introducción a la mecánica del flujo de sal, el diapirismo, la secuencia halocinética y el crecimiento pasivo del diapiro (downbuilding). Estos conceptos son fundamentales para entender el escenario geológico sobre el que se basa este proyecto.

3.3.1 Mecánica del flujo de sal: carga diferencial gravitacional

Conforme a la revisiones sobre la tectónica de la sal hechas por Hudec & Jackson (2007), las interpretaciones modernas sobre la tectónica de la sal sostienen que la fuerza impulsora del flujo de sal es la carga diferencial en lugar de la flotabilidad, como se pensó al inicio (Jackson, 1995). La carga diferencial consiste en tres tipos diferentes de carga: carga gravitatoria, carga desplazada y carga térmica. Este apartado del proyecto se centrará sólo en la carga diferencial gravitacional.

La carga gravitatoria se produce debido al peso de las rocas que se encuentran por encima de la sal y a su propio peso. Debido a que la sal tiene un comportamiento asimilable al de un fluido a lo largo de la escala geológica, su comportamiento puede ser estudiado utilizando el concepto de carga hidráulica, de la estática de fluidos dada en Kehle (1988).

Este concepto establece que el flujo, de acuerdo con el gradiente de carga, fluye de áreas con mayor carga a áreas con menor carga (si la carga hidráulica es constante en todo el dominio el fluido permanece en reposo).

La carga hidráulica tiene dos componentes: por un lado la elevación de la carga, que es la elevación de una partícula del fluido por encima del datum horizontal, y la presión de carga, que es la altura de la columna del fluido que puede soportar la presión ejercida por la roca suprayacente. Aplicando este concepto a la capa de sal y su sobrecarga la ecuación matemática sería:

$$h = z + \frac{\rho_0}{\rho_s} t$$

Donde h es la carga total hidráulica, z es la carga de elevación, ρ_0 es el promedio de la densidad de sobrecarga, ρ_s es la densidad de la sal y t es el espesor de la sobrecarga. Si la sobrecarga de la capa de sal tiene un espesor variable, se creará un gradiente de presión de carga en la capa de sal. Por lo tanto, la sal fluirá desde el área de mayor carga (carga de presión más alta) hacia el área de menor carga (presión de carga más baja). Esto se definiría entonces como el flujo de sal activado por la carga gravitatoria. Si la sobrecarga tuviera un espesor contante, como ya se ha dicho anteriormente, no habrá presión de carga o gradiente de elevación de carga, y la sal permanecería en reposo.

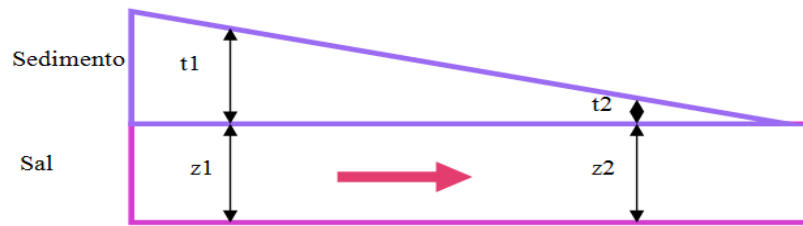


Figura 12: Boceto que muestra como el espesor de la sobrecarga varía lateralmente ($t_1 > t_2$) y genera un gradiente presión de carga desde el punto 1 al punto 2. No hay gradiente de elevación de carga ($z_1 = z_2$). La sal fluirá desde la izquierda hacia la derecha tal y como indica la flecha porque hay una diferencia en el gradiente total de carga. Modificado por Hudec & Jackson (2007).

3.3.2 Diapirismo y downbuilding

Hudec & Jackson (2007) hicieron una revisión de las maneras mediante las cuales la sal puede ejercer una sobrecarga frágil para formar un diapiro o pared de sal. Esto es conocido como estadio reactivo, se debe especificar que el diapirismo propiamente dicho está compuesto por tres fases: El diapirismo reactivo, el diapirismo activo y el diapirismo pasivo.

La descripción de cada uno es la siguiente: el diapirismo reactivo se aplica cuando la sobrecarga se extiende y un diapiro reactivo se eleva entre los bloques separados por la falla, figura 13 B, es el momento en el que se generan cabalgamientos y retro cabalgamientos, se falla la superficie porque nuclea el diapiro. Durante el diapirismo activo las solapas son elevadas y forzadas a un lado hasta que la sal sale a la superficie figura 13 C, se puede decir que en ese momento extruye el diapiro.

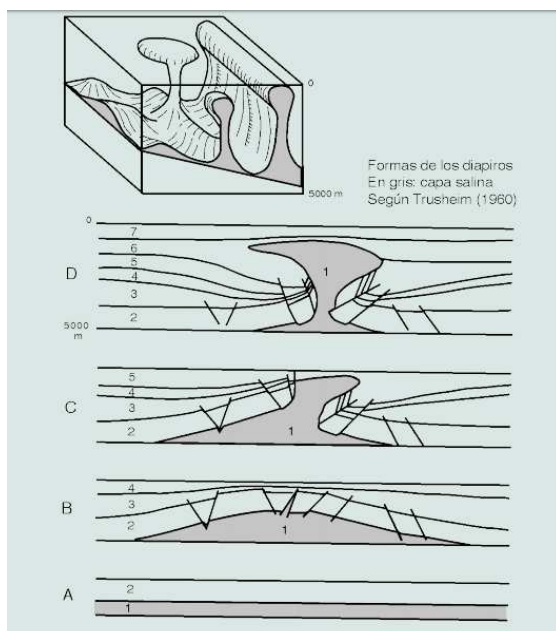


Figura 13: Esquema en el que se muestran algunas etapas del emplazamiento de un diapiro. Obsérvese el campo de fallas normales de la etapa B y el engrosamiento de los estratos 5 y 6 como consecuencia de la ascensión del diapiro en las etapas C y D. Según Trusheim (1960).

Una vez la sal aflora en la superficie, puede darse un nuevo proceso de crecimiento de un diapiro verticalmente mientras ocurre la sedimentación progresiva, encima del mismo. Dependiendo de la velocidad de sedimentación y el aumento neto del diapiro la forma del diapiro será diferente: cuando el diapiro exceda la tasa de aggradación, el diapiro se ensanchará hacia arriba, cuando esta tasa sea igual, el diapiro crecerá verticalmente, figura 13 D, y cuando el diapiro sea menor que la tasa de aggradación, el diapiro se estrechará hacia arriba.

Estos autores también explicaron que la sal puede elevarse miles de metros durante el downbuilding, y la pared de sal puede emplear todo este tiempo creciendo como un diapiro pasivo. Temporalmente las capas de sedimentos se pueden acumular en los flancos superiores del diapiro que pueden ser erosionados, desarrollando estratos irregulares en los márgenes conocidos como secuencia halocinética, concepto que se explicará con más detalle en el siguiente sub apartado.

3.3.3 Secuencias Halocinética

Fueron Giles & Lawton (2002) quienes definieron las secuencias halocinéticas como sucesiones relativas de estratos crecientes que son influenciados por el movimiento extrusivo de la sal y que son enlazados por encima por discordancias que se transforman de disconformes a conformes a lo lejos del diapiro.

4. Introducción a los modelos analógicos

4.1 Modelos analógicos

Un modelo analógico o análogo se usa para reproducir una situación u objeto real a escala de laboratorio. La modelización analógica en geología estructural se basa en la construcción de modelos geométrica, cinemática y dinámicamente dimensionados a sus equivalentes naturales, (Hubert, 1937 y Shellart, 2000). Para ello es necesario ajustarse a una serie de factores de escala que afectan tanto a las dimensiones del modelo (laboratorio vs. sistemas naturales) como a los materiales utilizados (materiales escalados con propiedades mecánicas conocidas en el laboratorio vs. rocas frágiles o dúctiles en los sistemas naturales), las propiedades que se estudian en estos materiales para poder lograr la analogía, son por ejemplo: el ángulo de fricción interna, la densidad, la cohesión, tamaño de grano promedio etc. La mayoría de estas propiedades se obtienen gracias a ensayos de laboratorio. El fin último de la modelización en geología es precisar mejor la evolución, las causas y los mecanismos de deformación causantes de las estructuras observadas en la naturaleza.

La modelización experimental es una técnica bien establecida y ampliamente utilizada en geología estructural para la comprensión de la mecánica de la litosfera y de las estructuras discontinuas que se desarrollan en ella. Ya en el siglo XIX se empezaron a reproducir algunos fenómenos tectónicos, tales como la formación de fallas, pliegues, diaclasas y otras estructuras (Cadell, 1888 y Daubrée, 1871). Desde entonces este método ha avanzado mucho, partiendo de experiencias puramente cualitativas en sus inicios, a los complejos modelos desarrollados actualmente en los que se respetan las reglas de similitud (geométrica, cinemática y dinámica) ya sea en tanto propiedades como características de los materiales utilizados. Además el uso de técnicas de análisis ampliamente utilizadas en otros campos de la ciencia ha permitido un gran progreso de la misma (ej. técnicas de análisis fotográfico seriado que permiten cuantificar la evolución de las estructuras resultantes, técnicas médicas utilizadas en la interpretación y análisis de tac seriados, escáneres submilimétricos, etc...).

5. Modelización analógica

Los modelos que se presentan en este capítulo tienen como objetivo la investigación de los principales parámetros que controlan la formación, geometría y evolución de las cuencas sinclinales. El desarrollo de fallas extensivas, determinado por la formación de cuencas sedimentarias que se desarrollan durante un periodo de extensión.

A continuación se proponen tres mecanismos diferentes para explicar la formación de estas cuencas sedimentarias de geometría sinclinal: sistemas que no involucran basamento (y suelen incluir, cerca de la base del sin-rift, un nivel salino sin- o pre-rift (sal Pérmica, facies Zechstein o sal Triásica Superior):

- 1) Por acomodación de las capas pre-cinemáticas, sedimentadas encima de un nivel salino y deformadas por una falla de basamento extensiva plana y rotacional o una falla extensiva plegada cóncavamente (Fig. 14A) (Soto et al., 2007).

En sistemas que involucran basamento:

- 2) Por propagación de una falla de basamento extensiva (Fig. 14B) (Withjack y Callaway, 2000).
- 3) por deformación del bloque superior por una falla extensiva escalonada con un pliegue superior convexo y un pliegue inferior cóncavo (Fig. 14C) (McClay y Scott, 1991). En estos casos anteriores, la forma y la cinemática de las fallas extensivas normalmente se ha establecido usando la geometría de los materiales pre- y sin-cinemáticos más superficiales asumiendo un completo acoplamiento de las rocas del bloque superior (Tankard y Welsink, 1989).

Por lo tanto, hay interpretaciones que no consideran u omiten, el papel que juega un nivel salino profundo, como un nivel de desacople. Esto choca con los datos que muestran que la sal claramente actúa como un nivel que desacopla la deformación de los materiales infra- y suprasal (Ferrer et al., 2014 y 2016). Sin embargo, mientras que algunas cuencas no han sido deformadas después de su desarrollo (ej., las cuencas de Jeanne d'Arc), la mayoría fueron afectadas por una deformación contractiva. Esta deformación se manifiesta como la inversión total o parcial de estas (e.j. cuencas de Broad Fourteens y Parentis,) e incluso en algunos casos, como por ejemplo las cuencas de Organyà y Cameros, que quedaron incorporadas en un cinturón de pliegues y cabalgamientos (Nalpas et al 1995, Witjack y Callaway, 2000, Soto et al., 2007, Mencos et al., 2014 y Ferrer et al 2016)

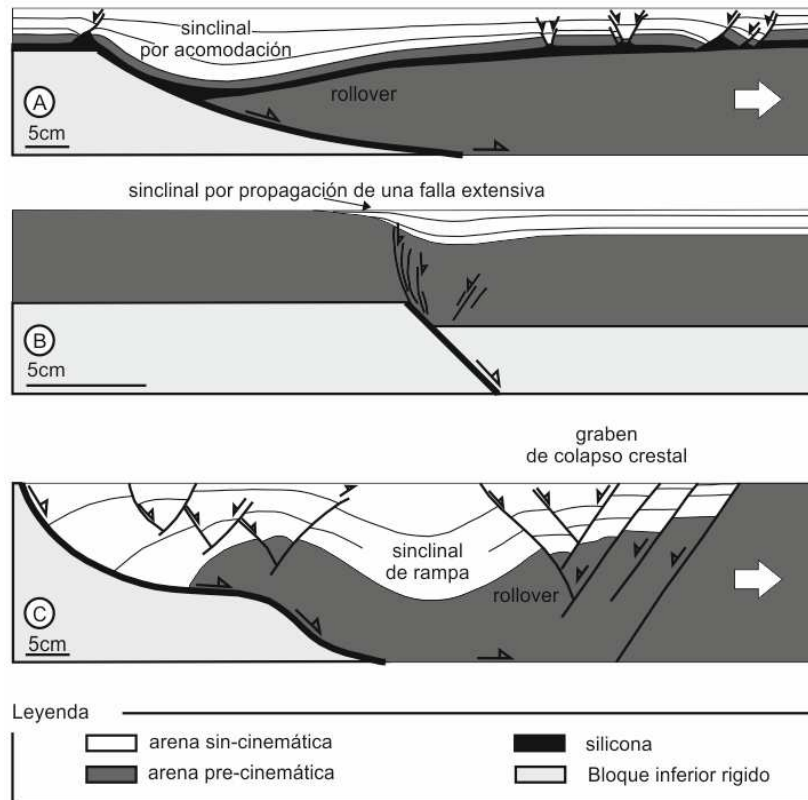


Figura 14. Secciones de modelos de arena ilustrando las geometrías asociadas: (A) a una falla lítica extensiva con un nivel de silicona localizado cerca del techo del paquete de arena pre-cinemática (modificado de Soto et al., 2007), (B) a una falla extensiva que se propaga hacia arriba (modificado de Withjack y Callaway, 2000) y (C) a una falla extensiva escalonada lítica sin un nivel de silicona pre-cinemática (modificado de McClay y Scott, 1991).

Su correcta caracterización es básica porque debido a su estructura y estratigrafía pueden contener diversos tipos de trampas petroleras.

Los dos modelos analógicos analizados en este trabajo de grado forman parte de un programa experimental mayor llevado a cabo por Maria Roma (co-directora de este trabajo de grado) durante una visita al *Earth Sciences Department* de la *Royal Holloway University of London* en 2015 como parte de su programa de doctorado. En este trabajo de grado se han analizado estos dos modelos aplicando nuevas técnicas en su estudio.

5.1.1 Configuración experimental

En la realización de los modelos analógicos se utilizaron los siguientes elementos.

- Una cuña rígida de madera (figura 15) que tiene la función de constreñir la geometría de la falla ejerciendo de bloque inferior de la misma a modo de basamento del cubo no

deformable tal y como muestra la figura 15. Esta cuña simula una geometría compleja de falla tipo *kink* con dos rellanos de 20 y 15 centímetros respectivamente y un buzamiento 3.5° . Entre estos rellanos existen dos rampas de 4.6 y 5.1 centímetros respectivamente que buzcan 45° . La altura de la rampa superior corresponde a la mitad de la altura de la rampa inferior. La geometría de esta cuña se estableció teniendo en cuenta ejemplos naturales existentes en la Plataforma Burgalesa (Pirineos Vascos) o de la Cuenca de Aquitania (Francia) a partir de los cuales se realizó el escalado de la misma.

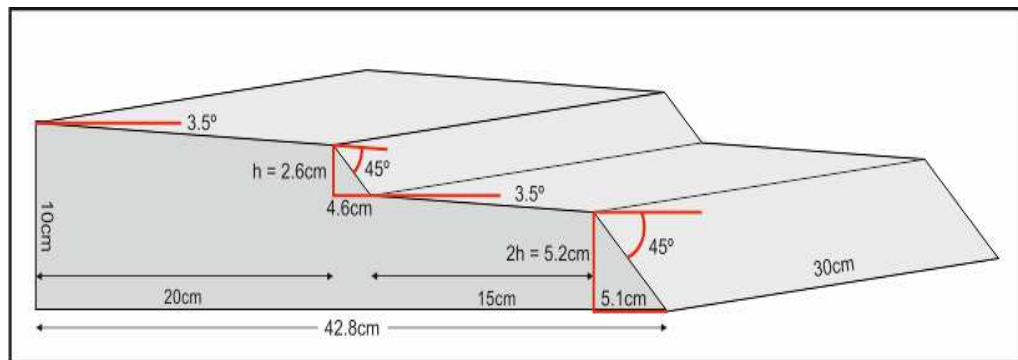


Figura 15: Esquema de la cuña utilizada en los experimentos con sus dimensiones.

- Una caja de deformación de cristal especialmente diseñada con dos paredes de metal ortogonales a las paredes de cristal generando un sistema confinado para el experimento. Las dimensiones de la caja son 63 cm de largo, 30 cm de ancho y 10.3 cm de profundidad. Tanto las dos paredes laterales de cristal como las dos paredes de metal que confieren la caja son fijas (figura 16). La cuña de madera se fija a un usillo que transfiere la deformación al modelo mediante un motor. Un film de acetato de longitud constante unido a ambas paredes fijas y dispuesto encima del bloque rígido hace a la par de nivel de despegue de todo el sistema adaptándose a la geometría del bloque rígido a medida que la deformación avanza y este se desplaza. Encima de este film es donde se deposita la arena que simulara los materiales de la corteza superior (figura 16).

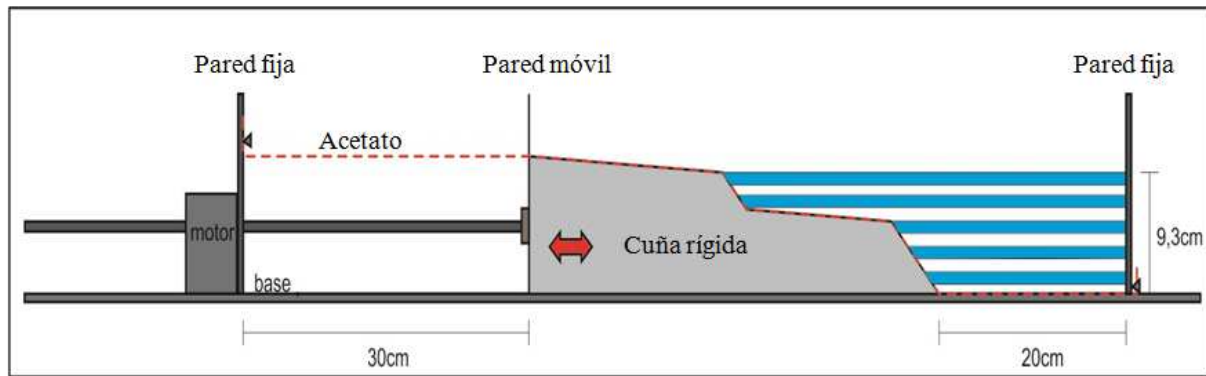


Figura 16: Esquema simplificado con la configuración inicial de los modelos analizados en este proyecto de grado. .

La diferencia principal entre los dos modelos analizados es que partiendo de la misma configuración inicial (figura 16) uno solo fue sometido a extensión, mientras que el otro además de la extensión fue posteriormente invertido. De esta forma el primero fue utilizado como guía a la hora de entender la estructura extensiva que posteriormente en el segundo modelo condicionaría la estructura contractiva.

5.1.2 Materiales

Los materiales análogos usados en los modelos experimentales incluyen arena seca de sílice con una granulometría de 200 micrómetros (percentil 50), sub-redondeada que simularía la deformación frágil de las rocas sedimentarias de la corteza superior. Además, un polímero de silicona viscoso (polydimethylsiloxane o PDMS, nombre comercial Rhodosil GUM de la empresa Bluestar Siliconas) fue utilizado como análogo de las rocas salinas en la naturaleza (Weijermars 1986, Couzens Schultz et al., 2003). El comportamiento viscoso del polímero favorece que este actúe de nivel de despegue durante la deformación extensiva y contractiva.

La arena de color blanco fue teñida con pigmentos de color azul, negro y rojo, se dejó secar en el horno durante 12 horas. Mediante una serie de análisis mecánicos con un *ring shear tester* (Panien et al., 2006), se comprobó que las propiedades mecánicas tanto de la arena blanca como de las teñidas eran similares.

Los valores obtenidos en estos análisis para ambas arenas son los siguientes:

- Ángulo de fricción interna: 30°
- Densidad: 1400 kg/m^3
- Cohesión: 10 Pa
- Tamaño de grano promedio: $150 \mu\text{m}$

El polímero utilizado presenta un comportamiento Newtoniano (*Weijermars 1986*) y tiene las siguientes propiedades:

- Viscosidad efectiva: $5 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Tensión: $1,83 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$
- Densidad: 972 kg/m^3 con $T=20^\circ\text{C}$

Es muy importante remarcar que el comportamiento de este polímero depende básicamente del tiempo, por lo que el escalado temporal para la velocidad de deformación (mm/hora) debe ser el correcto. De otra forma una velocidad demasiado elevada no permitiría la deformación dúctil de este material, actuando entonces como un material frágil.

5.1.3 Escalado

El escalado utilizado en el programa experimental se muestra a continuación en la tabla 2:

	Experimento	Natura	Ratio del modelo
Longitud inicial	62 cm	62 km	$1,05 \times 10^{-5} - 1,125 \times 10^{-5}$
Espesor inicial	93 cm	9,3 km	$1,2 \times 10^{-5}$
Densidad de la arena	1500 kg m^{-3}		0,55
Densidad de la sal	972 kg m^{-3}		0,44
Viscosidad de la capa dúctil	$1,6 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$	$10^{-18} - 10^{-19} \text{ Pa s}$	$1,6 \times 10^{-14} - 1,6 \times 10^{-15} \text{ Pa s}$
Coefficiente de fricción de la arena	0,7	0,8	0,87
Gravedad	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	1

Tabla 2: Factores de escala utilizados entre los experimentos y la naturaleza así como las ratios entre ambos.

5.2 Modelo 1 (Experimento Ex_04)

El modelo 1 tiene como objetivo mostrar el resultado de la deformación aplicando únicamente extensión.

5.2.1 *Configuración experimental y evolución cinemática*

La realización del modelo tiene dos etapas diferentes. Por un lado la etapa pre-cinemática que incluiría la deposición de todos los materiales previos al movimiento de la cuña inferior (figura 17a). Una vez el usillo accionado por el motor transfiere la deformación extensiva a la cuna, se sedimenta la secuencia sin-cinemática que incluiría todos los niveles depositados durante la etapa extensiva (figura 17b y 17c). Finalmente y a fin de preservar la topografía generada, se depositarían los materiales post-cinemáticos.

La secuencia pre-cinemática fue vertida manualmente sobre la cuña rígida y el acetato, alternando capas de 2.5 centímetros de grosor de arena blanca con las teñidas (azul y negro) (figura 16). Cada una de las capas fue nivelada con un enrasador instalado sobre un dispositivo móvil perpendicular a las paredes laterales de la caja de cristal. El proceso se repitió hasta cubrir la totalidad de la rampa superior, tal y como muestra el esquema de la figura 17a.

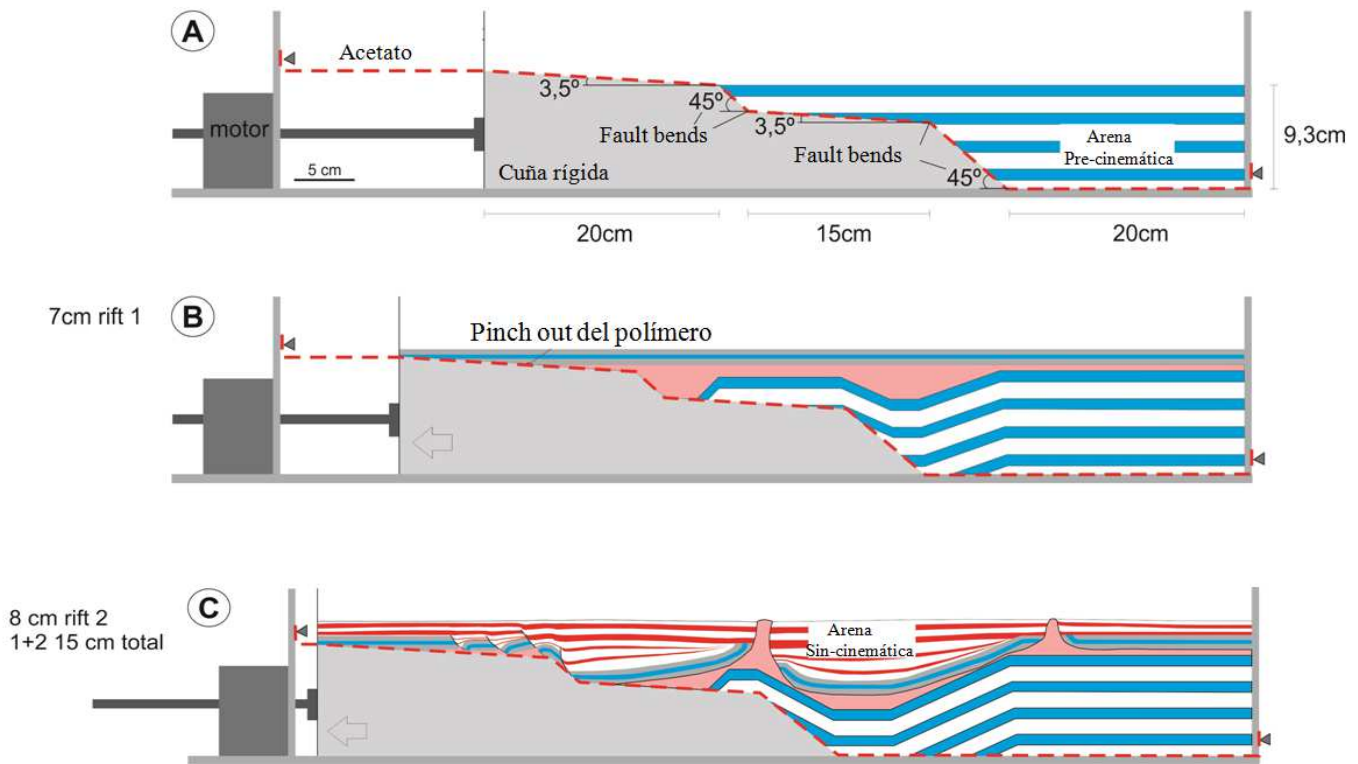


Figura 17: Esquema de los diferentes estadios evolutivos del modelo Ex_04. A) Configuración inicial con las capa pre-cinémáticas totalmente horizontales. B) Sedimentación del nivel de silicona sin-extensiva y varios niveles de arena sobreyacentes. C) Sedimentación sin-cinématica (capas rojas) y desarrollo de diapiros, estadio final del modelo después de 15 cm de extensión.

Después de la sedimentación de los materiales pre-extensivos (figura 17a) se procede con la primera etapa extensiva con una velocidad de 6cm/hora hasta alcanzar una extensión de 7 cm (figura 17 b). En este punto se introdujo el polímero llenando los dos sinclinales que se formaron por el desplazamiento de la cuña y el acetato (polígono de color rosa en la figura 17b). El polímero se introdujo en diferentes fragmentos cubriendo las cuencas generadas y se dejó reposar durante más de 24 horas para favorecer el flujo de la silicona para favorecer su horizontalidad. Es importante remarcar que en la parte izquierda del modelo donde acaba la silicona contra el rellano 1 se forma un pinch-out, marcando el fin de la silicona, señalado en la figura 17 b.

Una vez la capa de silicona alcanzó la horizontalidad se depositaron diversas capas de arena con un espesor total de 10mm a modo de materiales pre-cinemáticos respecto a la segunda etapa de extensión que se aplicaría al modelo. En esta etapa se extendieron 8 cm mas pero con una velocidad menor (10mm/hora) ya que se quería favorecer que el polímero actuase dúctilmente (figura 17c).

Durante esta segunda etapa extensiva la sedimentación sin-cinemática fue vertida manualmente a intervalos regulares intercalando los diferentes colores para rellenar el espacio creado por el desplazamiento del bloque rígido añadiendo una nueva capa sin-cinemática cada 5mm de extensión. Para la deposición de cada capa el modelo se detuvo alrededor de 15 minutos. La deformación extensiva generó zonas donde el polímero se concentró produciendo hinchamiento a causa de su migración lateral desde los depocentros situados debajo de las cuencas sinclinales. A causa de estos levantamientos se produjo erosión local durante la sedimentación de las capas sin-cinemáticas tal y como ocurre en la naturaleza. Esto favoreció la extrusión local del polímero en superficie generando glaciares de silicona. Estos se erosionaron manualmente antes de añadir la siguiente capa sin-cinemática, simulando la disolución de la sal o su erosión en la naturaleza. A partir de la extrusión de silicona en superficie y para simular el desarrollo de diapiros pasivos se aumentó la regional 3 mm para cada nivel sin-cinemático.

Al finalizar la extensión y para preservar el relieve generado en la parte superior del modelo se añadió una capa de arena post-cinemática (figura 18), esto inhibe posibles movimientos posteriores en el modelo.



Figura 18: Sección final del modelo Ex_04 con la capa final de post-cinemática de color amarillo para prevenir posibles movimientos posteriores de la silicona.

5.3 Modelo 2 (Experimento Ex_03)

Este modelo es similar al modelo descrito anteriormente (Experimento Ex_04) pero además de las dos etapas extensivas fue posteriormente invertido. La evolución durante las etapas extensivas fue similar a la descrita para el Modelo 01 (punto 5.2.1 de la memoria) por lo que la descripción de este modelo se centrará en añadir lo que se observa en la etapa contractiva final cuando se produce la inversión de las cuencas sinclinales generadas durante la extensión.

5.3.1 Configuración experimental y evolución cinemática

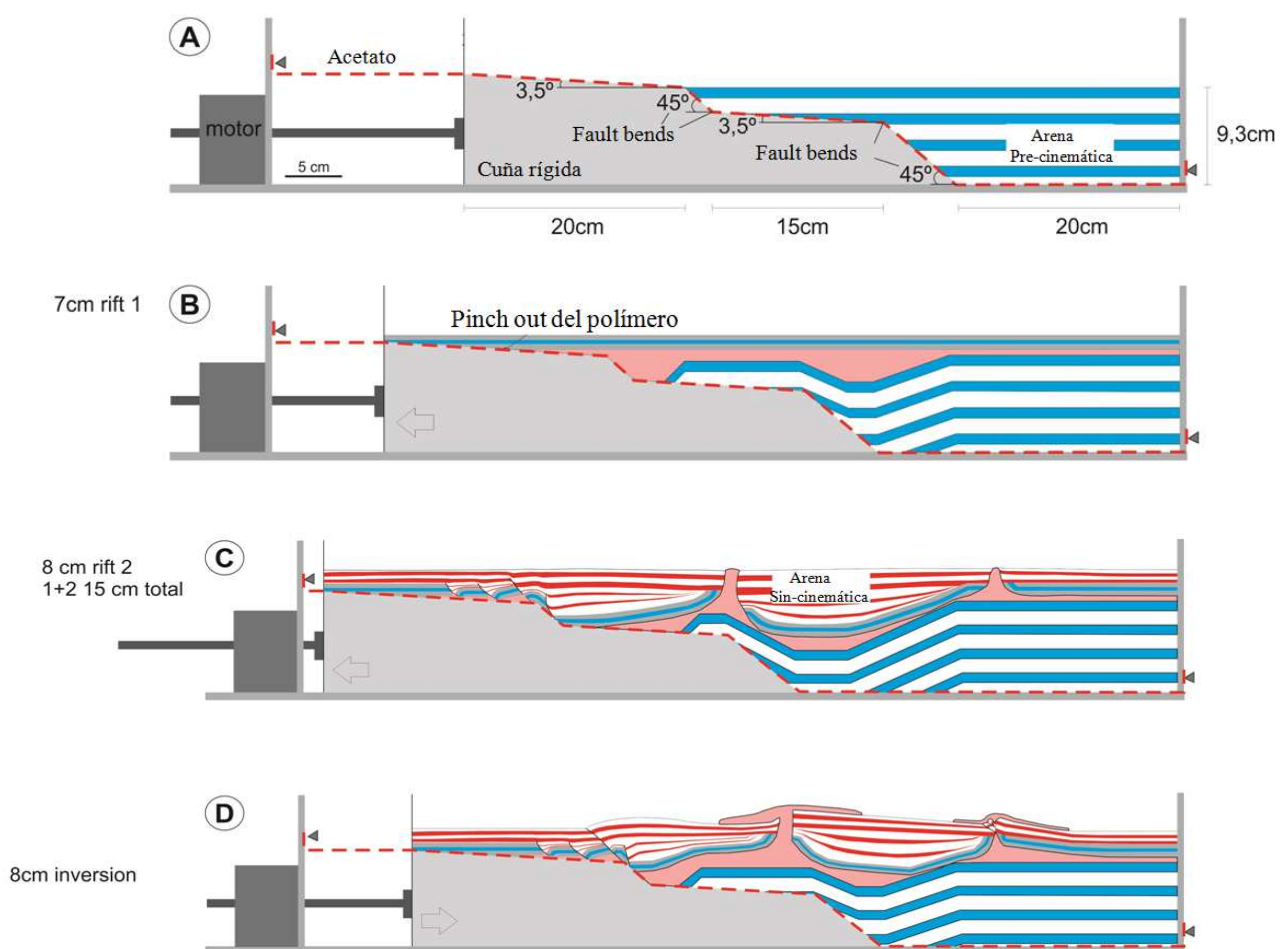


Figura 19: Esquema de los diferentes estadios evolutivos del modelo Ex_04. A) Configuración inicial con las capa pre-cinématicas totalmente horizontales. B) Sedimentación del nivel de silicona sin-extensiva y varios niveles de arena sobreyacentes. C) Estadío al final de la extensión con la consiguiente formación de cuencas sinclinales limitadas por diapiros. D) Estadío al final inversión con la consiguiente inversión de las cuencas sinclinales (comparar con la figura 17c).

A diferencia del modelo Ex_04 en este caso una vez finalizada la extensión, el experimento fue invertido usando el mismo ratio de velocidad de deformación que durante la extensión (10mm/h) hasta alcanzar una inversión final de 8 cm lo que provocaría una inversión total de las cuencas sinclinales (figura 19D) alcanzándose el punto nulo .

Al finalizar el modelo y para preservar la topografía generada durante la etapa compresiva se añadió una capa de arena post-cinemática que inhibe también posibles movimientos de la silicona posteriores a la finalización del modelo (figura 20).

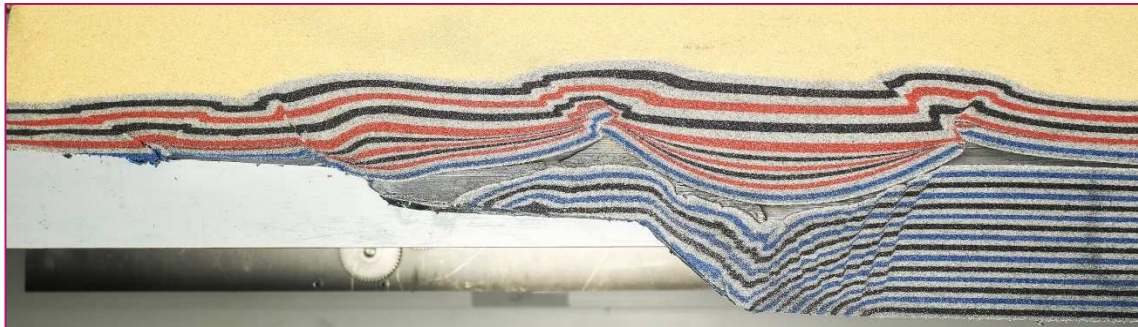


Figura 20: Sección al final de la etapa de inversión del modelo Ex_03 donde se puede observar la capa de arena post-cinemática de color amarillo preservando la topografía generada durante la inversión.

5.4 Procesado de los datos analógicos

5.4.1 Captura de los datos

Para poder realizar el estudio exhaustivo del modelo se llevaron a cabo una serie de procedimientos para capturar el máximo de información posible. Para ello se creó un sistema artificial de luces para evitar sombras indeseables durante el registro de imágenes. Se tomaron fotografías a intervalos regulares de tiempo de ambos laterales del modelo así como también de su top durante la deformación de los mismos. Las fotografías se realizaron con cámaras digitales de alta resolución controladas por ordenador. El intervalo de disparo entre fotografías fue de 1 minuto.

5.4.2 Seccionado del modelo

Para finalizar el proceso se humedeció el modelo con un endurecedor con el fin de aumentar suficientemente su cohesión y posteriormente proceder con su seccionado. Para evitar efectos de borde indeseados debidos a la fricción de la arena en los cristales, se eliminaron los 2.5 cm en contacto con las paredes laterales de cristal. Posteriormente se procedió al seccionado de los modelos en secciones longitudinales (paralelas a la dirección de extensión y de acortamiento) con un espaciado de 3mm entre cada sección. Todas las secciones fueron fotografiadas.

5.5 Limitaciones experimentales

Como limitaciones experimentales se tienen que tener en cuenta diferentes factores, por un lado el factor de escala, la necesidad de hacer estudios preliminares exhaustivos en la zona, la no anisotropía de los materiales utilizados y la velocidad de deformación utilizada.

La primera de las limitaciones viene dada por la dificultad de llegar a la analogía exacta. Un factor escala correcto es difícil de conseguir, aunque se estudien las características principales de la arena en este caso, hay factores que resulta difícil controlar como podría ser la tensión superficial. La superficie específica no sería la misma y en este caso resultaría difícil de controlar.

Es evidente que un modelo de este tipo no se puede realizar sin tener al alcance bastante información de la zona que se desea modelar. Se necesita conocer datos de estratigrafía, petrología, espesores, distribución y más, toda esta información se obtiene a partir de estudios geofísicos. Una vez se tienen los resultados y se ha hecho un estudio de la deformación que ha sufrido la zona, se puede proceder a hacer el modelo. Por lo tanto, este tipo de herramienta no es útil en un primer estadio de prospección ya que la información sería escasa y el modelo no acabaría pareciéndose a la realidad. Esta es una limitación importante pero a su vez es una forma de recopilar toda la información obtenida, agruparla y poder tener una visión global y conjunta de todos los elementos. Esta es su verdadera utilidad.

Es importante remarcar que en los dos modelos llevados a cabo los polímeros de silicona son añadidos después de la primera extensión. Esta capa de polímero no presenta anisotropías mecánicas ya que se trata de un material homogéneo. En la naturaleza lo que ocurre con más frecuencia es que las capas no sean totalmente homogéneas. Este hecho puede condicionar la deformación final que se produce, puede haber zonas más o menos dúctiles. En la naturaleza las capas no son homogéneas a lo largo de todo el estrato, esto condiciona su comportamiento mecánico.

Otro factor importantísimo es la velocidad de deformación. Para los modelos estudiados se utilizaron dos velocidades de deformación diferentes en las dos etapas de deformación teniendo en cuenta los materiales analógicos usados. En una primera fase, y para deformar los niveles frágiles de arena se utilizó una velocidad elevada de 6cm/hora. Sin embargo para la deformación del modelo después de la deposición de la capa de silicona, tanto en extensión como en inversión, se utilizó una velocidad bastante más baja para favorecer la deformación dúctil de este material, la velocidad fue de 10mm/hora.

Si la silicona hubiese sido deformada a la misma velocidad aplicada en la primera etapa extensiva, los resultados habrían sido distintos. A elevadas velocidades de deformación, la silicona tiene un comportamiento frágil, de aquí la importancia de dimensionar y escalar correctamente estas velocidades.

5.6 Construcción e interpretación del volumen sísmico a partir de secciones analógicas

Para la realización del cubo sísmico se utilizaron las fotografías de las secciones longitudinales del modelo comentadas en el apartado 5.4.2. Para ello se siguió la metodología desarrollada por Hammerstein et al. (2014). Esta metodología permite convertir las fotografías a datos sísmicos estándar (formato SEG-Y) para posteriormente ser cargados en un software de interpretación sísmica para ser tratados y trabajados como un volumen sísmico. En el caso de los modelos incluidos en este proyecto de grado se trabajó con el programa *Petrel* de *Schlumberger*. Destacar que este programa es ampliamente utilizado en la industria petrolera para interpretar y caracterizar los reservorios. Este programa no se ha enseñado a utilizar durante los estudios de grado de ingeniería geológica.

Las fotografías seriadas de las secciones realizadas al final del modelo se prepararon, recortaron y procesaron digitalmente con el programa Photoshop previamente a su introducción en el programa de interpretación. Las fotografías tuvieron que ser procesadas a blanco y negro, ya que el formato SEG-Y de la sísmica es binario, y el programa atribuirá valores entre 0 (negro) y 1 (blanco) a las diferentes tonalidades de grises para equipararlo. Una vez cargados estos datos se les georeferenció localmente teniendo en cuenta su tamaño real. De esta forma cada sección ocupa una posición conocida en el espacio con una separación entre imágenes de tres milímetros (espaciado entre las diferentes secciones durante el corte del modelo). A partir de este punto y con el ‘plug-in’ desarrollado por Hammerstein et al. (2014) se convirtieron las secciones en perfiles sísmicos digitales. Hasta aquí se dispone solamente de una serie de perfiles 2D separados 3 mm entre cada uno correspondientes en número al número de secciones realizadas al final del modelo.

El siguiente paso fue la interpolación entre estos datos para obtener un volumen sísmico. Esto es posible por el espaciado entre secciones. Con un espaciado mayor esta interpolación no se

conseguiría. Los perfiles sísmicos convertidos a SEGY son tratados como las inlines (*Inlines*) del volumen sísmico, obteniendo también las correspondientes crosslines (*Xlines*) y las secciones en profundidad (*depth slices*) tal y como se puede apreciar en la figura 21. Este tipo de dato es totalmente comparable con los datos sísmicos reales que las compañías petroleras adquieren para el estudio de posibles zonas productoras y se trabajan de la misma manera.

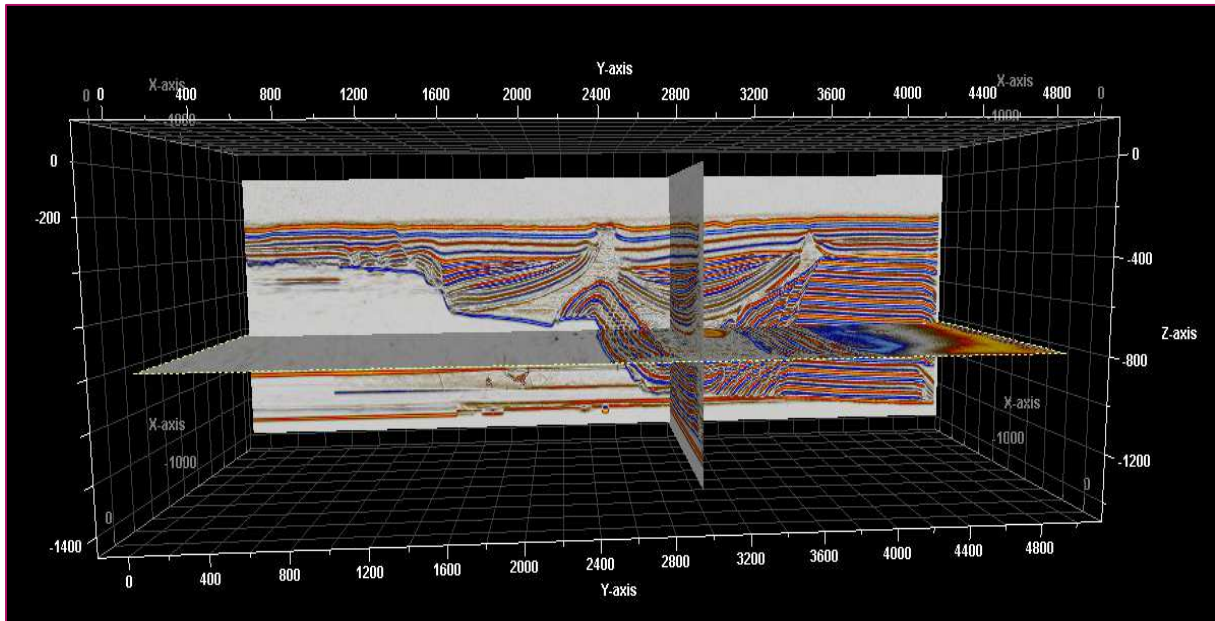


Figura 21: Volumen sísmico obtenido a partir de las secciones longitudinales del modelo analógico Ex_04. La sección paralela a los márgenes de la figura corresponde a los *Inlines*, la sección ortogonal a esta es un *Xline* y finalmente la sección horizontal corresponde a un *depth slice*. Este volumen es el punto de partida para la modelización con el software Petrel.

Una vez es creado el volumen sísmico se procede a su interpretación con el programa Petrel. Para hacerlo se digitalizaron los horizontes y las estructuras más representativas de cada modelo (etapa de *picking*). Esto se hace usando el módulo de interpretación sísmica.

Tal y como ocurre en los datos sísmicos reales de mala calidad, esta digitalización no pudo hacerse de forma automática utilizando la herramienta autopicking, por lo que se realizó manualmente a lo largo de todo el volumen para cada elemento interpretado. Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo se decidió digitalizar cada elemento interpretado (horizontes y estructuras) a intervalos de aproximadamente 12 secciones sísmica. Las estructuras que se decidieron digitalizar fueron, en cuanto a horizontes, las capas divisorias de las diferentes estructuras principales. Se empezó digitalizando el top del modelo y capas en profundidad con un intervalo de 4 capas. Es importante remarcar que se hizo especial énfasis en las capas que enmarcaban los cambios estructurales más notorios, en este caso capas influyentes como el

techo y la base de la silicona, la primera capa del rollover y algunas capas del semi graben y el sinclinal central.

En cuanto a las fallas las que fueron digitalizadas fueron, aquellas que forman los salt rollers del rellano superior, la falla normal curva y las fallas antitéticas que se forman en el estadio pre cinemático del modelo.

Todas las líneas de color rojo fueron dibujadas punto a punto a pulso sobre la visión 2D del modelo, para llevarlo a cabo se generaba la capa llamándola por su nombre (ej: Capa top, base sinclinal, etc.) y especificando sus características principales, su profundidad y a que estructura pertenecía. Una vez se ha dibujado punto a punto la línea se hacía un salto de 12 inlines y se repetía el proceso hasta llegar al final. Se recuerda que el modelo tenía un total de 90 inlines.

Cuando se empezó la digitalización del top de la silicona surgieron muchos problemas en su etapa de picking. En la fase de resultados y discusiones se explicará que las paredes salinas no son lineales lateralmente, hay zonas en la que los diapiros no llegan a extruir.

Como hay variaciones de este tipo al ir digitalizando los perfiles de esta capa, se producían cambios muy notables en la altura de la capa y al interpolar la superficie el resultado no se asemejaba a la realidad. Para solucionarlo, en capas problemáticas como esta, se disminuyó el número de inlines de interpretación a interpretación. Pasando de interpretar cada 12 perfiles a interpretar cada 4 o 8 perfiles e incluso menos cuando se acercaba a la extrusión de los diapiros.

El resultado de este proceso es un “esqueleto” de elementos tal y como se muestra en la figura 22.

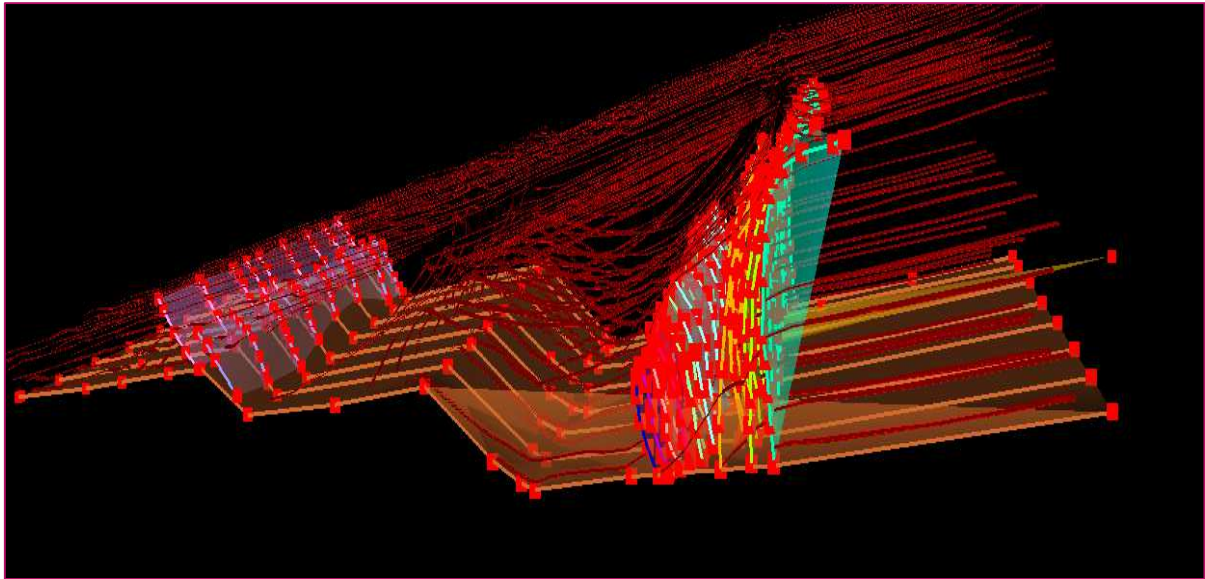


Figura 22: Esqueleto con los elementos interpretados a partir del volumen sísmico donde se puede observar la primera fase de digitalización de los horizontes (líneas rojas sin puntos) y de las fallas (planos de colores con puntos rojos).

Concluida la fase de digitalización se procedió con la modelización geológica 3D. Durante esta etapa se crearon superficies geológicas para cada uno de los horizontes interpretados con las diferentes herramientas del programa. Algunas de estas superficies tuvieron que ser editadas para reducir problemas de solapamiento o intersección entre superficies contiguas en las zonas con geometrías complejas. A partir del esqueleto del horizonte interpretado en las diferentes secciones sísmicas el programa realiza una interpolación utilizando este horizonte como dato duro. La interpolación se realizó con un algoritmo convergente una vez delimitado el contorno de cada horizonte. La figura 23 muestra varias superficies realizadas a partir de los elementos digitalizados. En concreto se pueden apreciar, de arriba abajo el techo del polímero, su base y la falla principal (bloque de madera).

Las primeras superficies interpoladas son las más características, aquellas superficies que separan los diferentes estadios, el pre cinemático, el sin cinemático y el post cinemático. También superficies representativas de las características generales del modelo experimental. Algunas capas que describen la deformación que se ha experimentado. Entre estas superficies se tienen, entre otras, la cuña, que actúa como falla de basamiento, la base y el techo de la silicóna tal, la superficie del rollover, etc. Tal y como muestra la figura 22.

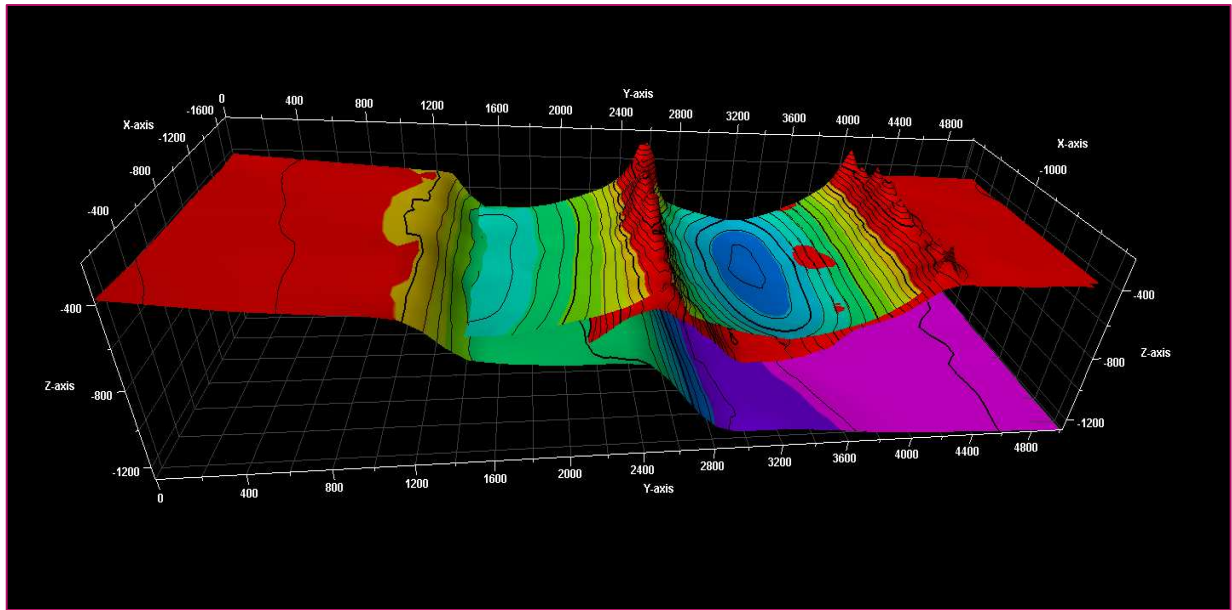


Figura 23: Tres superficies construidas a partir de los elementos digitalizados. Los diferentes colores indican las diferencias de profundidad (eje Z) para un mismo elemento, así para la superficie superior (techo del polímero de silicóna) se pueden apreciar las zonas más elevadas de color rojo, correspondientes a las paredes salinas y diapiros. Los colores azulados corresponden a las zonas deprimidas atribuibles a los depocentros de las dos cuencas sinclinales.

El siguiente paso es conocer la interacción entre las diferentes superficies principales de cada modelo para ello se generan las diferentes superficies al mismo tiempo, esto es posible gracias a la herramienta Structural framework esta herramienta consta de tres puntos diferenciados, en primer lugar la definición de la geometría, la modelización de fallas y por último los horizontes.

Por lo que concierne a la geometría se define como límites los límites automáticos de la geometría del cubo, en la parte inferior de esta pestaña se puede elegir la magnitud de las coordenadas x e y del modelo, para que sea posible una interpolación sin un coste computacional demasiado elevado se elige $i=20$, $j=20$ esto asegura que el modelo no quedará distorsionado. Para realizar la modelización de las fallas principales se incorporan las fallas a esta pestaña, se aplica y se aceptan las condiciones.

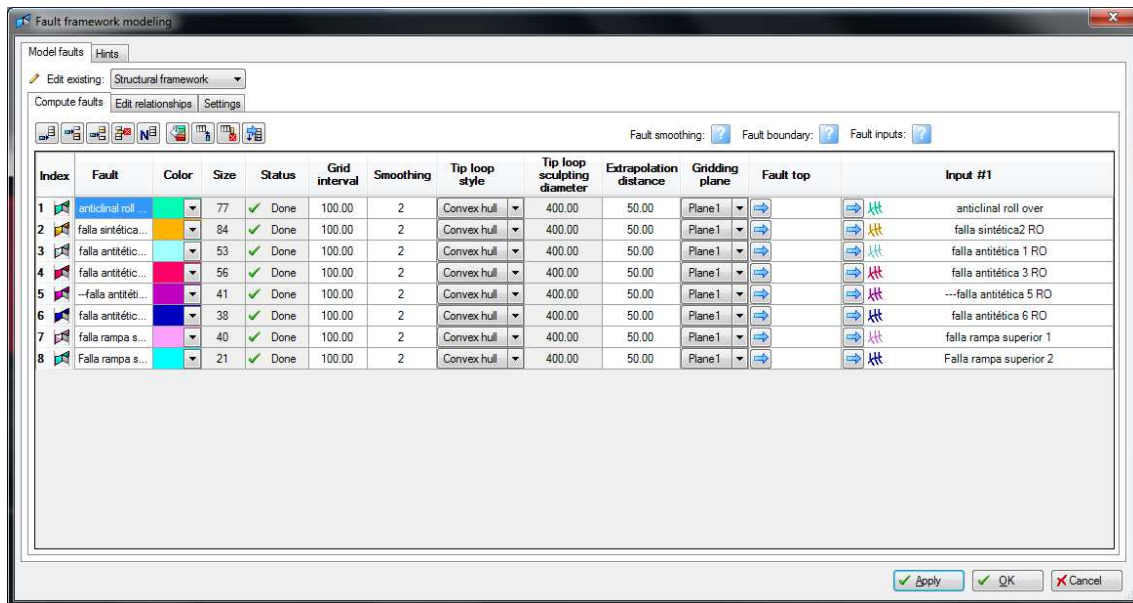


Figura 24: Pestaña del software Petrel donde se puede ver como se genera la modelización de las fallas del modelo, a partir de las fallas principales eligiendo el algoritmo de interpolación adecuado.

La modelización de las superficies se hace por orden estratigráfico se incorporan los horizontes principales en orden y para finalizar se usa la capa de cuña, como esta capa no es un horizonte sino una falla es por eso que se utiliza la superficie de la cuña, al ser una superficie se comporta como un horizonte. En la parte superior de esta ventana se tiene la opción de generar zonas geológicas, las zonas que se han decidido modelar a grandes rasgos sería la zona pre-cinemática, la zona sin-cinemática y la zona post-cinemática.

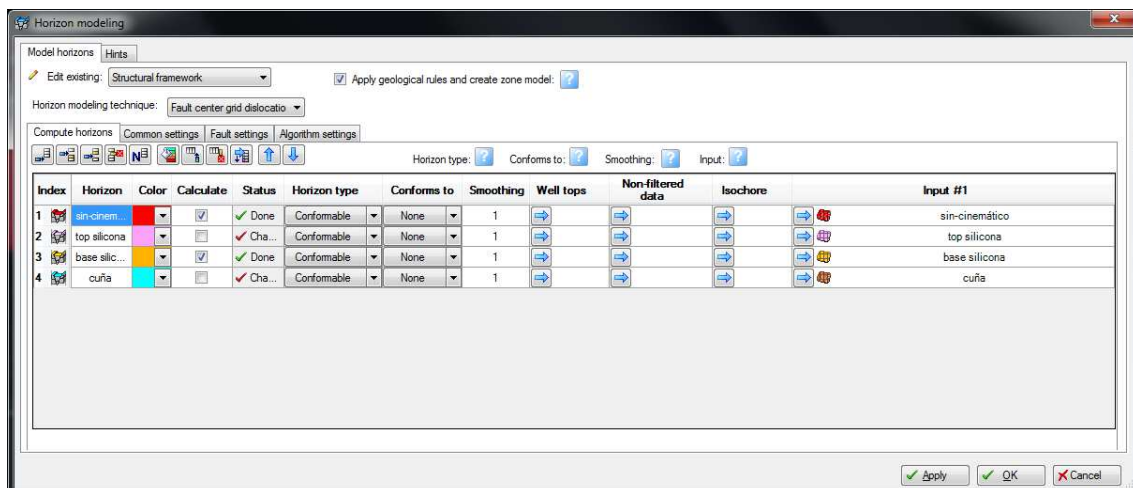


Figura 25: Captura de pantalla del software Petrel de la pestaña horizon modeling, en esta captura se puede observar como los horizontes están modelados en orden estratigráfico, para poder modelar las zonas geológicas de forma correcta.

Al aplicar y aceptar se generan una serie de carpetas, en concreto 3, una con las superficies de fallas, una segunda con las superficies de horizontes y una tercera con las zonas incorporadas en un cubo, el resultado de la modelización, activando todas las capas anteriores se puede observar en la figura 26.

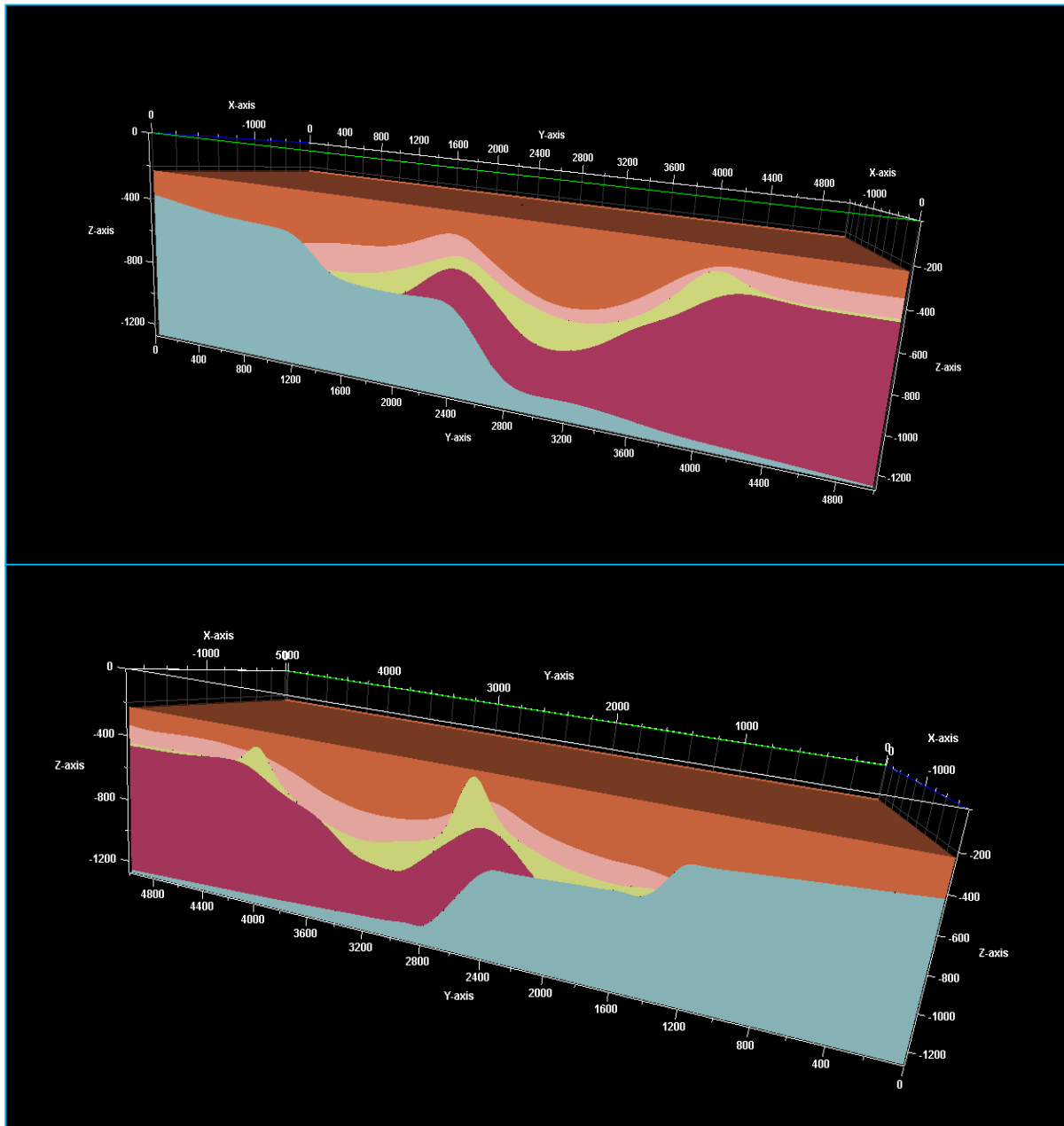


Figura 26: Capturas de las dos perspectivas de la modelización del cubo, en estas capturas se puede observar la cuña rígida de color azul, la fase sin cinemática de color fucsia, amarillo y rosa siendo la capa amarilla la silicona y por último la fase post-cinemática representada de color naranja.

5.7 Limitaciones de la modelización

Por lo que respecta a las limitaciones no referentes a la modelización analógica en sí, existen unas series de limitaciones ligadas a la digitalización de los modelos. Como en la mayoría de programas de interpretación sísmica y de modelado geológico, el programa utilizado en este proyecto tiene una limitación para la digitalización de horizontes que presentan varias profundidades para una misma coordenada (x,y). Este problema es conocido geológicamente como superficies multi-evaluadas y es común en contextos compresivos cuando una misma capa se repite a varias profundidades debido a la existencia de cabalgamientos. También suele ocurrir en tectónica salina cuando la sal adquiere geometrías irregulares en las que su techo se repite a varias profundidades para una misma coordenada en superficie.

La versión del programa utilizado para la interpretación y modelización geológica (Petrel 2012) no permite considerar superficies multi-evaluadas de una forma sencilla. En lo que a los modelos se refiere este problema afectaba a la extrusión de los diapiros en la parte superior del modelo, en donde generaba glaciares de silicona (*overhangs* en la literatura inglesa) tal y como muestra la figura 27. Para solucionar este problema se barajó la posibilidad de cambiar de programario para la interpretación del techo del polímero y utilizar MOVE, una plataforma que sí dispone de la herramienta que permite trazar superficie multi-evaluadas. Finalmente dado el carácter del trabajo de grado, y al tiempo que hubiese requerido el aprendizaje de este nuevo programa, se considero que este paso quedaba fuera de los objetivos de este proyecto de grado. Finalmente, se optó por digitalizar la extrusión de los diapiros hasta la superficie del modelo sin considerar el material involucrado en los glaciares de silicona.

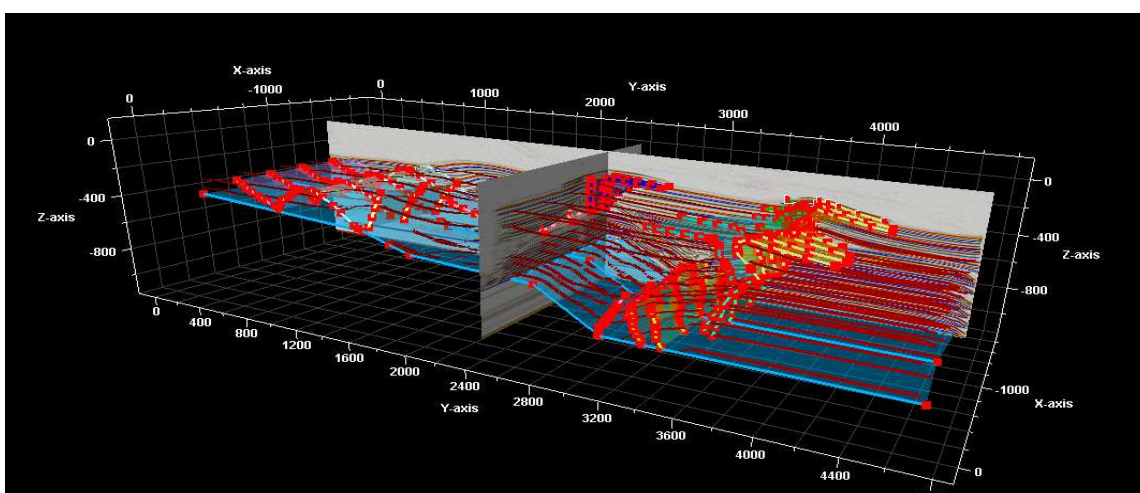


Figura 27: Primera fase de interpretación con el software Petrel del modelo 2, se pueden apreciar los glaciares de silicona.

6. Resultados experimentales e interpretación

A continuación se analizarán los resultados obtenidos a partir de los dos modelos experimentales, tanto el modelo 1 (experimento EX_04, con extensión) como el modelo 2 (experimento EX_03, con extensión y posterior inversión).

Para facilitar la descripción de los resultados experimentales se describirán teniendo en cuenta dos estadios diferenciados: una primera etapa extensiva que no incluye sedimentación sin-cinemática (rift 1) y una segunda etapa extensiva en la que se incluye un nivel de silicona y sedimentación sin cinemática (rift 2).

6.1 Extensión

Tal y como se ha explicado en el capítulo de configuración experimental, en el modelo 1 se han reproducido dos fases extensivas de 7 y 8 cm, llegando a 15 cm de extensión total. A continuación se muestran los resultados obtenidos en estas dos fases de deformación.

Primera etapa de extensión (rift 1)

Al inicio del proceso de la extensión la primera estructura que se desarrolla es un pliegue de acomodación relacionado con el cambio de pendiente entre el segundo rellano y la rampa inferior. Se trata de un anticlinal generado por la adaptación de los materiales pre-cinemáticos a la geometría de la falla durante la primera parte de la extensión. A consecuencia del cambio de pendiente entre la rampa inferior y la base del modelo se genera un sinclinal de rampa en el centro del modelo y un anticlinal “rollover” que limita el margen derecho de la cuenca que se genera, tal y como muestra la figura 33 a.

La cantidad de rotación en el rollover es proporcional a la cantidad de extensión y a la geometría de la falla (Ellis & McClay, 1988).

En el segundo cambio de pendiente aparece una falla normal planar con un fuerte buzamiento (prácticamente vertical) en profundidad que se curva hacia arriba perdiendo buzamiento. Esta falla toma la apariencia de una falla inversa debido a la curvatura. Se forman a su vez una serie de fallas antitéticas que acaban formando parte del flanco del rollover.

Se puede describir entonces de derecha a izquierda del cubo una serie de estructuras diferenciadas, en primer lugar un rollover bien desarrollado, un sinclinal asociado a la segunda rampa y un pliegue de acomodación en la parte superior de la primera rampa, figura 33a.

Al final de la primera extensión (rift 1) el depocentro (zona de la cuenca en donde una determinada unidad estratigráfica alcanza su máxima potencia) del sinclinal inferior está a la misma profundidad que el segundo rellano. Al final de la extensión se observa que se ha realizado una extensión suficiente para que el depocentro del sinclinal inferior esté a la misma profundidad que el segundo rellano.

Al final de esta primera extensión el sinclinal que se forma presenta una geometría muy angulosa, tal y como se muestra en la figura 17 (b) y (c). Es importante remarcar que la falla normal curva a medida que se procede a la extensión va variando de posición. Al final de la extensión se encuentra exactamente a 7cm de su posición inicial que es el total de la extensión a la que ha sido sometido el modelo experimental.

La futura evolución cinemática, estará condicionada por las estructuras que se han formado durante a la primera extensión.

Al finalizar esta primera etapa de extensión y tal y como se ha explicado en el apartado 5.2.1 se introduce el polímero para rellenar los espacios que se han producido debido a la extensión y se deja reposar el modelo 24h hasta que la silicona se distribuya y se posicione de forma totalmente horizontal, figura 17 (b).

Segunda etapa extensiva (Rift_2)

Extensión – rift 2 una vez colocada la capa sin-cinemática de silicona y las capas supra salinas

Según la distribución que toma la silicona se tienen zonas donde el espesor de polímero es muy escaso como puede ser a la izquierda del modelo justo encima de la rampa superior. Justo en este punto se observa como al empezar la segunda extensión la falla normal que se forma se propaga a través del polímero hacia la cobertera, desarrollando un semi graben que acaba soldándose con la rampa superior, figura 33b.

No ocurre lo mismo con la rampa inferior, ya que el espesor de polímero es mayor y la falla no llega a propagarse hacia arriba.

Encima del pliegue de acomodación (heredado de la primera etapa de extensión) se produjo una inflación del polímero, tal y como se ha explicado en el apartado de tectónica salina, la sal se mueve debido a diferencia de presiones. En este caso el peso que se ejerce sobre la silicona en el sinclinal es mayor que el que ejerce el material por encima del anticlinal, eso provoca un movimiento por diferencia de presión que acaba provocando una inflación en la charnela del pliegue de acomodación generando un graben. Este fenómeno se asocia al diapirismo reactivo. (Fase inicial del diapirismo en la que existe una acumulación de sal que provoca una serie de fallas normales por extensión que acaban formando un graben). Figura 33 b.

Debido a los movimientos gravitacionales que genera el rellano superior que se encuentra inclinado, genera pequeñas fallas despegadas en la silicona, estas fallas presentan en su bloque inferior una parte de polímero en forma triangular.

Mientras tanto, justamente en la charnela del rollover nuclea una pared de polímero reactivo, se habla de una pared y no de un diapiro ya que presenta una continuidad lateral a lo ancho de todo el modelo, no extruye en todos los puntos.

A los 5 cm de la segunda extensión, es decir, a los 12 cm totales de extensión las dos estructuras de polímero son reactivas, es decir que en los dos lados hay fallas. Cuando se aumenta un cm más la extensión estas estructuras pasan a ser pasivas. A partir de esta etapa se procede a cortar la silicona que extruye del modelo y se eleva la regional un total de 3mm para cada nivel sin-cinemático.

A partir de que los flancos de cuenca sinclinal se sueldan con los materiales infra polímero debido a la extinción de silicona, desde ese momento la extrusión de polímero disminuye considerablemente.

El resultado de la extensión fueron dos depocentros separados por una pared salina (polímero) y los salt rollers de la parte superior. El depocentro superior (sema graben) es completamente asimétrico, La falla de basamento se propaga hacia arriba a la cobertera, debido al poco espesor del polímero, esto implica que tanto la parte superior como la inferior a la sal se encuentran acopladas y el estilo estructural en este caso es un sistema de piel gruesa.

La cuenca inferior representa una cuenca sinclinal con geometría simétrica, mucho más horizontal que en la primera fase de extensión. Esta cuenca estaba totalmente controlada por el polímero, ya que está delimitado por las dos paredes salinas. La presencia de una gran cantidad de polímero inhibe la propagación hacia arriba de la falla desde debajo de la silicona y a través de ella hacia la cobertera, por lo tanto la acomodación de la extensión entre la base y la cobertera está totalmente desacoplada. A este estilo estructural se le denomina piel delgada.

Un aspecto clave a tener en cuenta es que en las paredes de polímero solo extruyen en determinadas zonas y el resto son fallas, estas zonas no extruyen ya que lo que hacen es alimentar a los diapiros que si llegan a extruir

Esto en cuanto a las estructuras que se han generado durante la extensión, como ya se ha introducido en el apartado 5.2.

A continuación se ilustrará el proceso de creación del modelo 3D de la deformación del modelo.

El punto de partida como ya se ha comentado anteriormente son las imágenes inline, xline y depth slice tal y como se muestra en la figura 21. A partir de ellas se eligen las estructuras más características que son las que se decide digitalizar, obteniendo líneas rojas para los horizontes y planos para las fallas. Las estructuras principales que se deciden digitalizar son: El rollover bien desarrollado, las fallas antitéticas, el semi graben de la rampa superior y el sinclinal central del modelo.

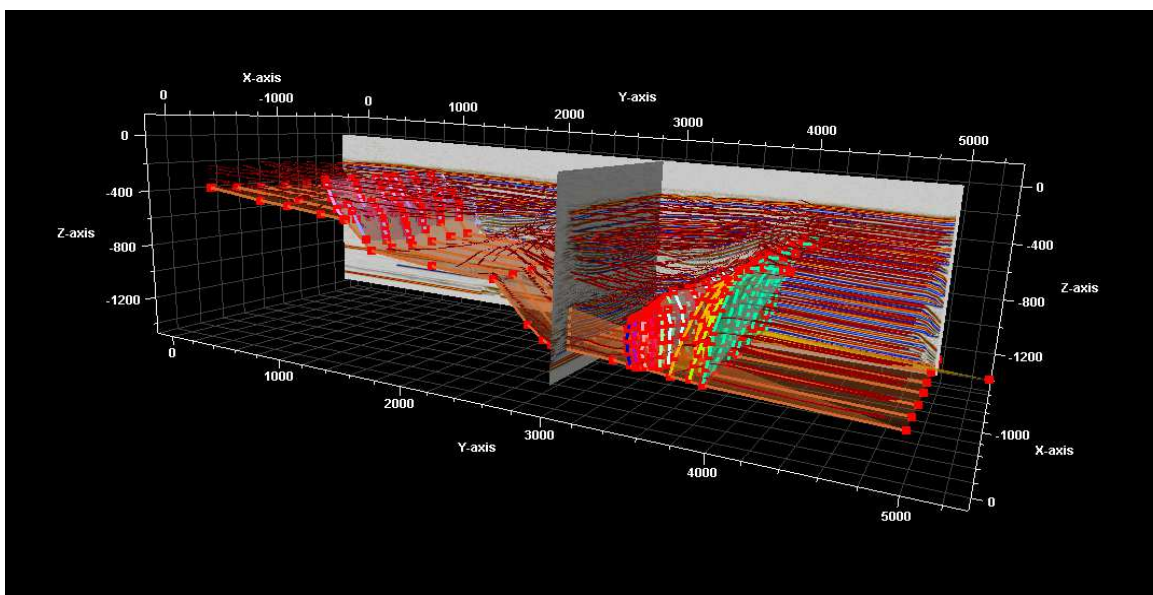


Figura 28: Primer estadio de la modelización, donde se puede observar el detalle de la curvatura de las fallas normales antitéticas, ligeramente convexas hacia arriba.

A continuación se presentarán las diferentes fases de la modelización con el programario Petrel, en primer lugar se presenta la deformación del material pre cinemático en este caso representado de cómo morado junto a la cuña rígida de color azul claro. Se puede apreciar la forma tanto del pliegue de acomodación como del rollover, que son las dos grandes estructuras que caracterizan este estadio pre extensivo.

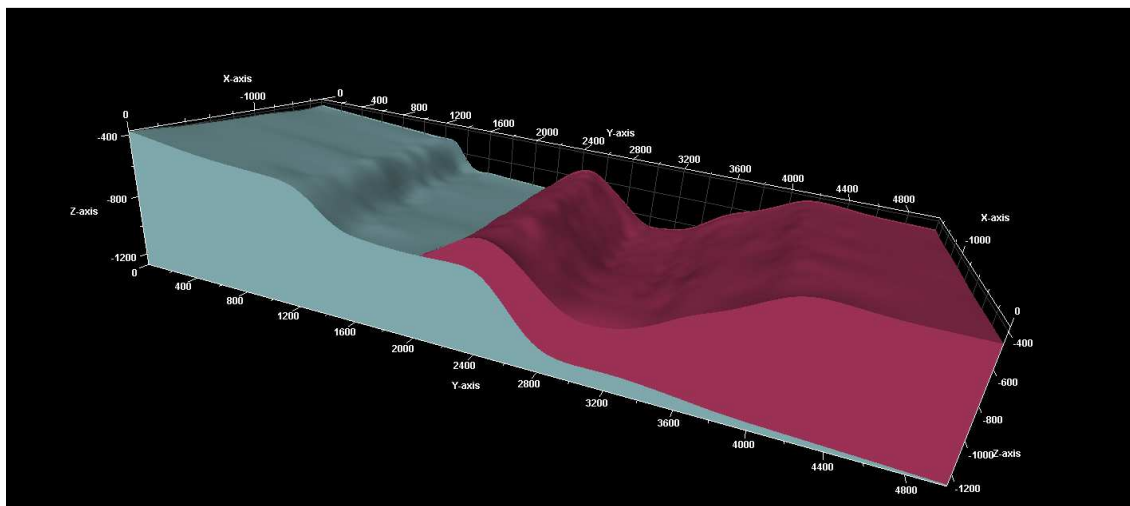


Figura 29: Modelo geológico de la deformación del material pre-cinemático.

La siguiente figura respresenta el estadio final de la silicona, en esta imagen se ve claramente la forma que toman las paredes de polímero y como no alcanzan todos los picos la misma altura. Se ha concluido que los puntos que no extruyen alimentan a los puntos que si lo hacen. Es importante notar que en esta imagen aparecen pequeñas manchas de color morado, esto corresponde a zonas donde la silicona se ha extinguido totalmente, ha emigrado de tal forma que tanto la capa supra silicona como la infra silicona se juntan en dichos puntos (soldaduras).

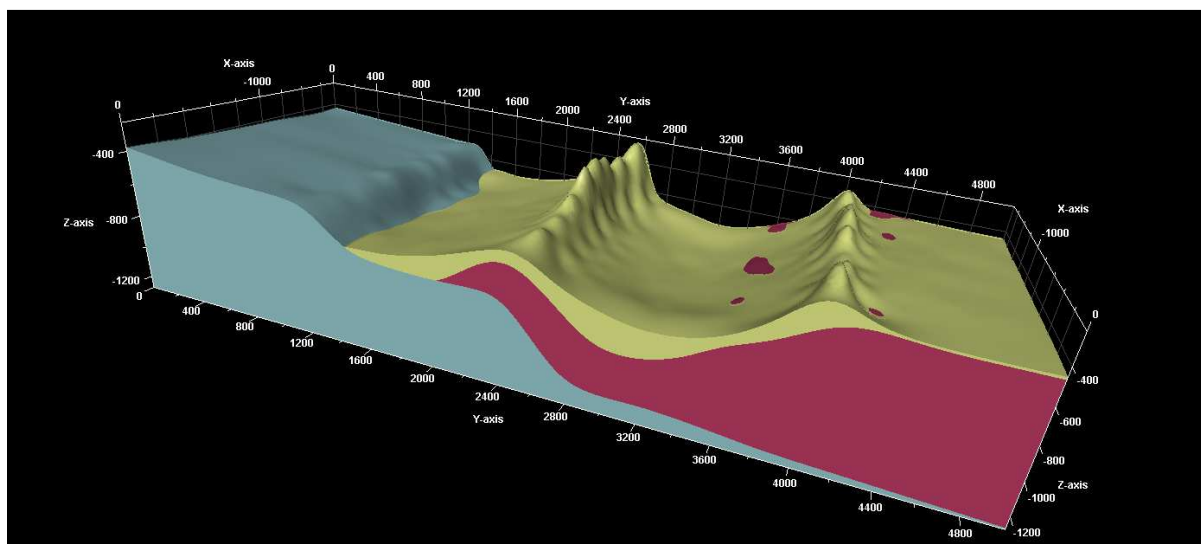


Figura 30: Estadio final de la deformación del polímero y zonas de extinción de la silicona en el modelo.

En este punto se muestra la capa sin-cinemática, aquella que se ha añadido a medida que se iba deformando el modelo, en este caso esta representada de color rosado y se puede observar la diferencia de profundidad entre el sinclinal central del modelo y el semi graben de la rampa superior, detalle que se puede ver también en la figura 23.

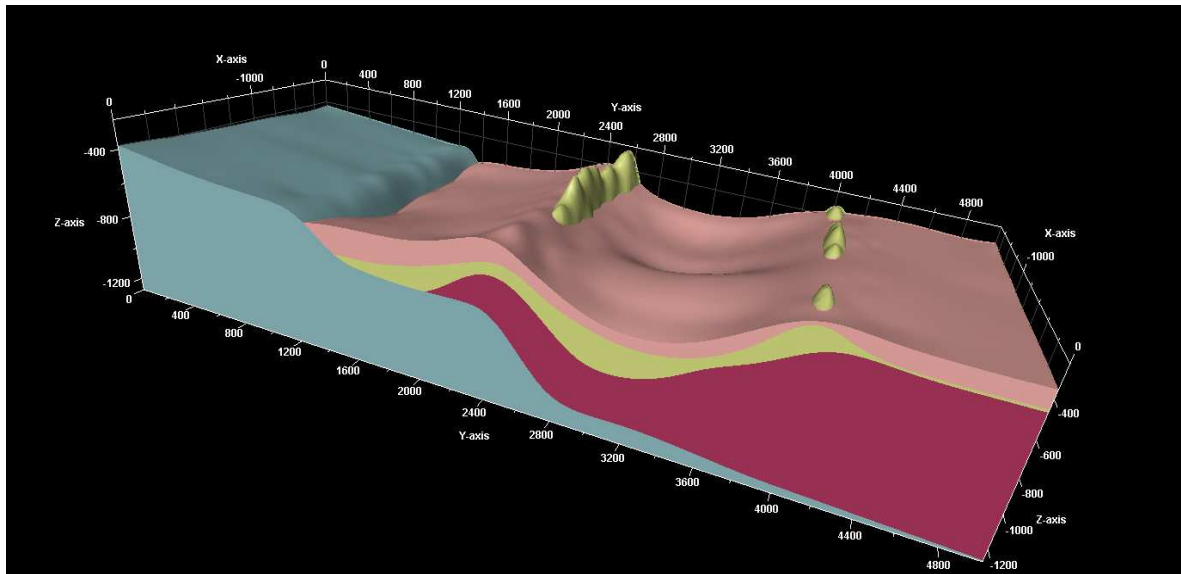


Figura 31: Estadío final de deformación del cubo con las capas pre-cinemática y sin-cinemática.

Para finalizar la modelización se añadió una capa post-cinemática en este caso se representan de color naranja, la función principal de esta capa es limitar posibles movimientos posteriores de la silicona.

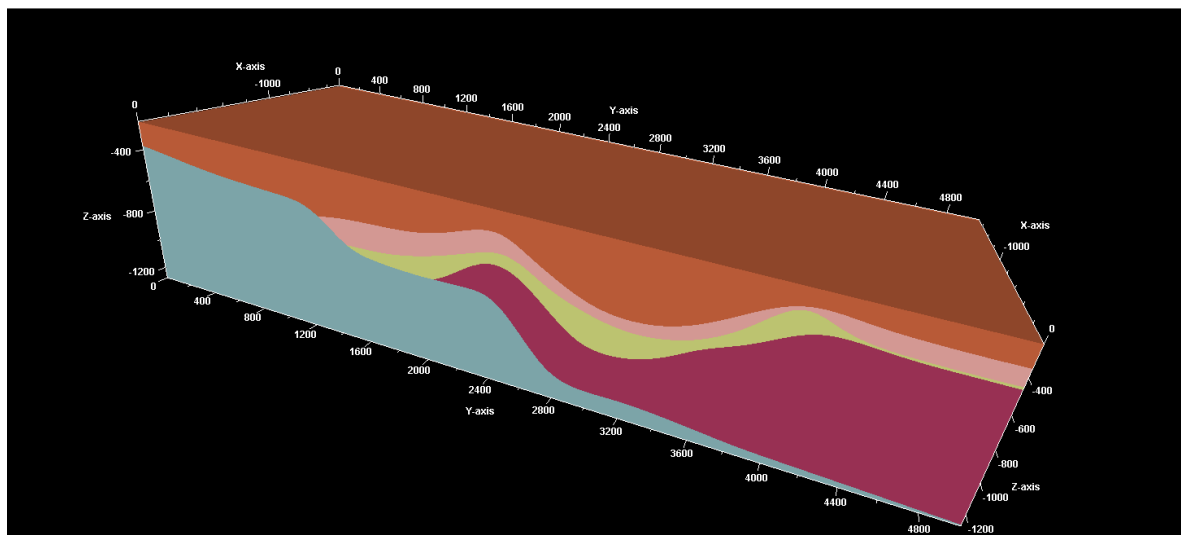


Figura 32: Estadío final de la deformación con las capas pre-cinemática, sin-cinemática y post-cinemática.

6.2 Compresión

En esta fase se describirán los resultados obtenidos a partir del modelo 2, el experimento Ex_03. En este caso los resultados de la extensión de los dos modelos son prácticamente iguales.

Es importante remarcar que en este tercer estadio de deformación se pretende llegar a una inversión total, la contracción será de un total de 8 cm y se pretende llegar al punto de partida del final de la primera extensión, es decir el estadio mostrado en la figura 17 (b), en este caso las capas depositadas encima de la silicona son isopacas, es decir que tienen el mismo espesor a lo largo de todo el modelo y serán la referencia para detectar si una vez recuperada la segunda extensión se vuelven a conectar.

La parte pre-cinemática se transporta durante la compresión pasivamente sobre la falla para al final volver a la posición final de la extensión 1, aparentemente no presenta ningún tipo de estructura compresiva. Tal y como se ha comentado en el apartado anterior el sinclinal que se forma en el centro del modelo al principio de la extensión 2 presenta una geometría angulosa, Figura 33 A y al finalizar esta etapa presenta una geometría mucho más planar horizontal tal y como muestra la figura 33 B. Cuando se finaliza la compresión la geometría del sinclinal vuelve a hacer angulosa figura 33 C, se recupera parte de la deformación generada por la segunda extensión.

A partir de este momento se ve como la falla normal de la falla superior se propaga hacia arriba. Generando un anticlinal asimétrico con el flanco izquierdo, más corto y bastante más inclinado que el derecho que es mucho más horizontal y alargado. A esta estructura de semi graben invertido se le denomina estructura de arpón, tal y como se observa en la figura 8 y en la figura 33 B. En el Pinch out del polímero se generan un cabalgamiento y un retrocabalgamiento, estas dos estructuras generan un pop-up que sería una elevación del terreno, figura 33 B.

La pared salina que se genera encima del rollover está totalmente ahorcada y una vez se generan las soldaduras nucleas cabalgamientos y retrocabalgamientos, figura 33 B.

En el diapiro central también existe un estrechamiento pero al haber bastante más cantidad de silicona no se llega a soldar, extruye más silicona pero no se llega a ahorcar, por este motivo no aparecen estructuras compresivas (cabalgamientos y retrocabalgamientos en este caso). En la zona central donde no llega a extruir el diapiro se generan más estructuras compresivas como cabalgamientos y retrocabalgamientos ya que el material se comporta de una forma más frágil por la ausencia de polímero, generando pop-ups. En cambio donde hay más polímero la deformación se acomoda de forma más dúctil formando pliegues.

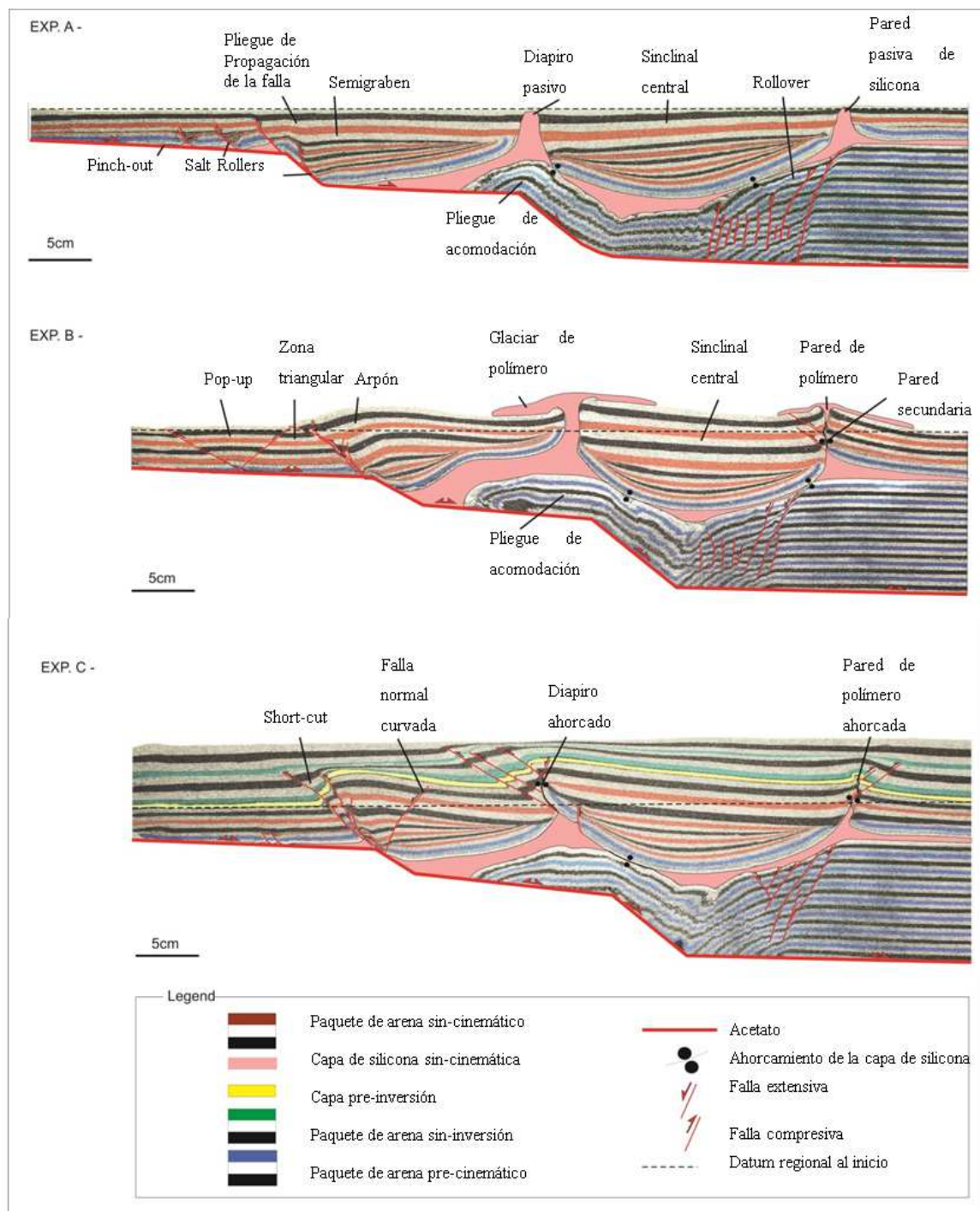


Figura 33: Secciones finales de las tres fases de deformación, en primer lugar la extensión de 7 cm, el segundo rift de 8 cm y la inversión de 8cm. En estas figuras se muestran las estructuras más importantes que se generan en cada una de las fases de deformación (Maria Roma 2015).

Una vez se han explicado las principales estructuras generadas a partir de la compresión. Se pretende ilustrar la deformación sufrida a partir de las siguientes imágenes del modelo, se trata de depth slice, inline y crosslines del modelo 2.

Se pretende analizar dos tipos diferenciados de inlines, por una parte una con extrusión del diapiro izquierdo (figura 34) y otra sin esta extrusión (figura 35).



Figura 34: Inline del modelo experimental EX_03, en el que se observa la extrusión del diapiro central.



Figura 35: Inline del modelo experimental EX_03, en el que no hay extrusión del diapiro central.

A continuación se trata de observar como varía el alzado del modelo variando el punto de toma de la imagen, en este primer caso (figura 36) , se ha tomado el alzado a la izquierda del modelo.

Se observa el poco espesor de material debido a la altura de la cuña rígida de madera, se observa también el cambio de uniformidad de las capas a partir de la segunda capa roja empezando desde abajo. Esto es debido al cabalgamiento que forma parte del pop-up del rellano superior.

En cuanto al perfil se observan las estructuras características de este modelo (figura 33 B), estructuras tales como el pop-up compuesto por un cabalgamiento y un retrocabalgamiento, la estructura de arpón (anticlinal) , el pliegue de acomodación, el diapiro central y el sinclinal.

La planta muestra la cartografía de la deformación. De izquierda a derecha se pueden observar: el cabalgamiento, el retrocabalgamiento, la falla normal, el glaciar del diapiro y el sinclinal.

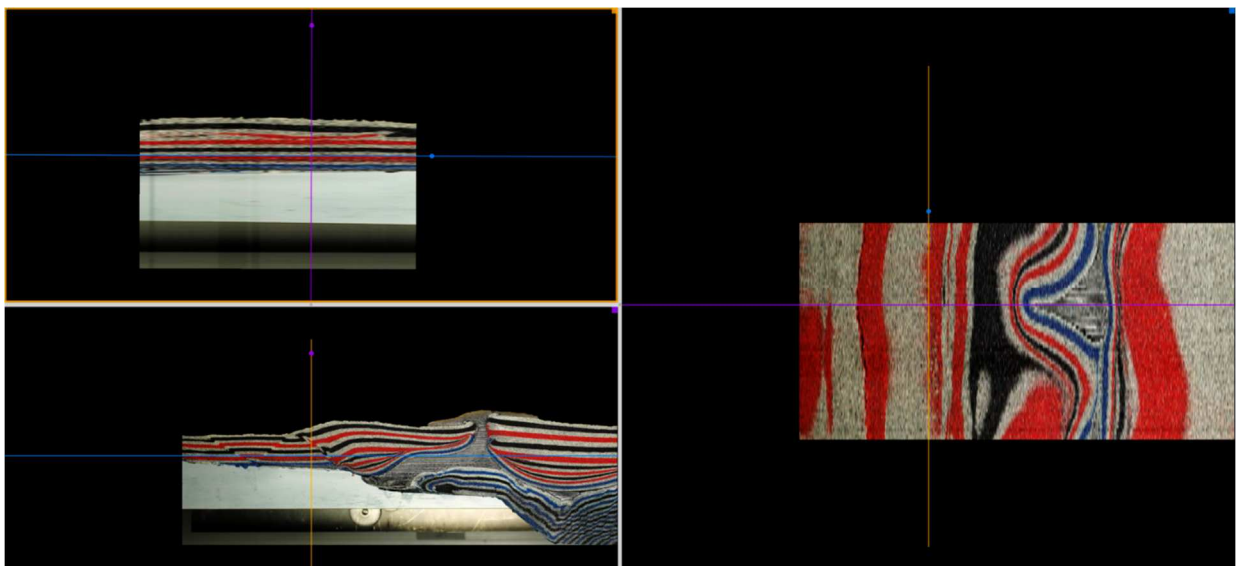


Figura 36: Alzado, planta y perfil del modelo experimental Ex_03. Alzado de la parte izquierda del modelo.

Desplazándose ligeramente a la derecha se obtiene un alzado totalmente diferente, se puede observar como nuclea el diapiro y como la presión que genera desplaza las capas superiores (figura 37).

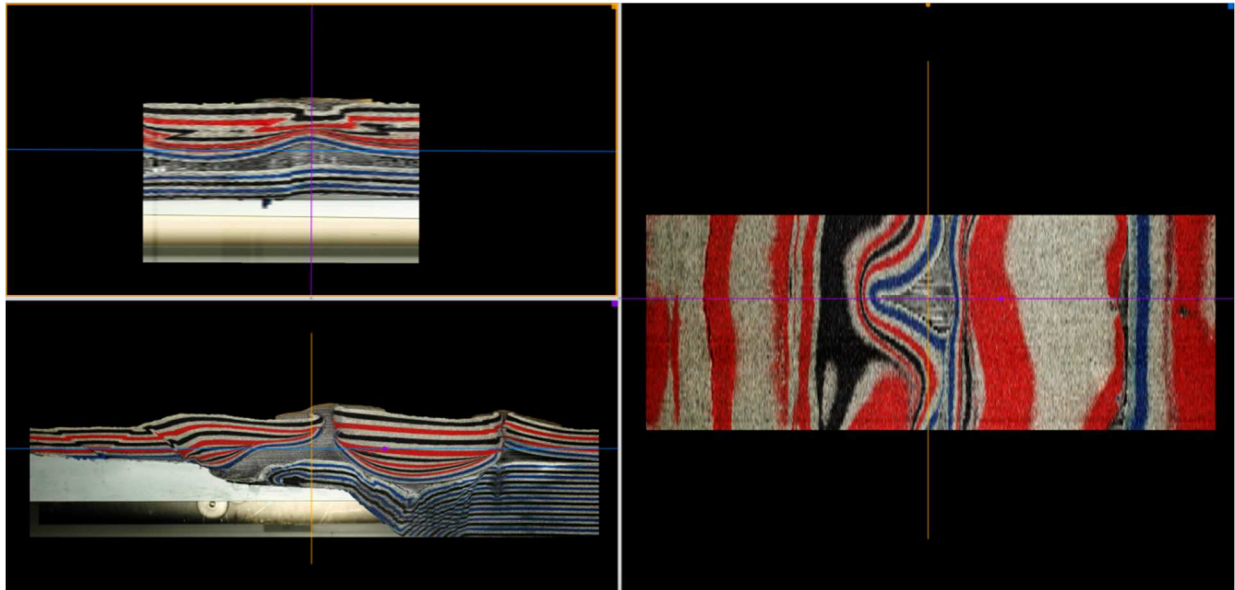


Figura 37: Alzado, planta y perfil del modelo experimental Ex_03. Alzado a la altura de la primera pared de sal, se observa en la imagen como parte de la pared salina alimenta al diapiro que acabará extruyendo. En cuanto a la planta se observan las estructuras anteriormente mencionadas, se ve claramente la estructura del sinclinal central y la pared salina de la derecha del modelo.

Avanzado en el modelo se obtiene el siguiente grupo de imágenes, figura 38. En el alzado se observa el espesor total del modelo, se observa el paquete pre cinémático de colores azules y el paquete sin cinémático de color rojo, en la parte superior izquierda se observa parte del glaciar de silicona.

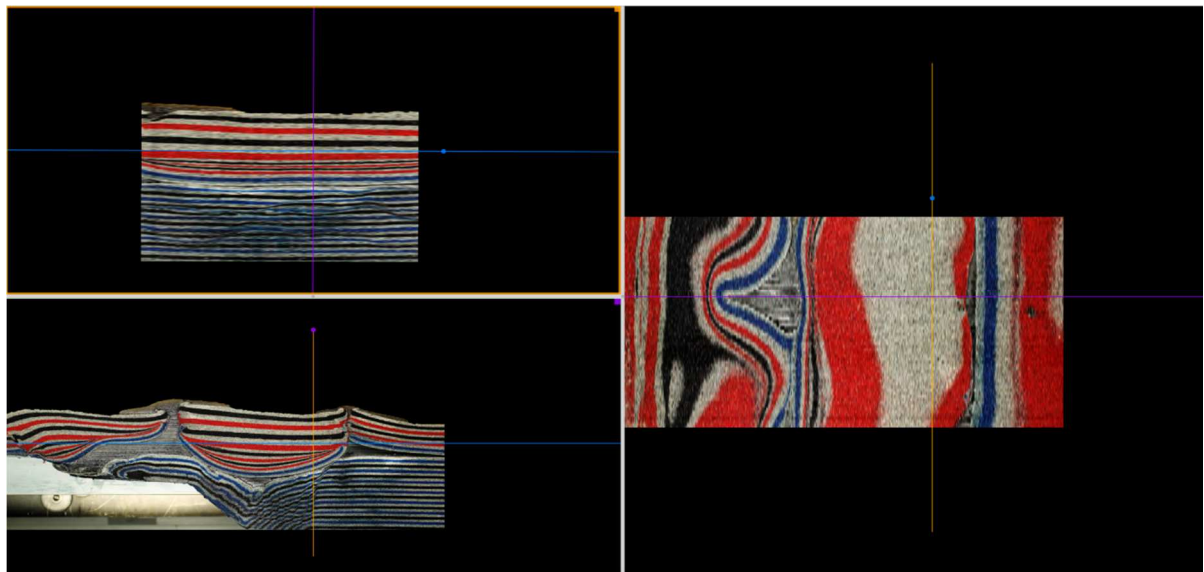


Figura 38: Alzado, planta y perfil del modelo experimental Ex_03. Alzado a la derecha del modelo, a la altura del sinclinal central, antes de la segunda pared salina.

Para obtener una imagen del perfil donde no extruya el diapiro se desplaza la toma de la imagen a las primeras inlines del modelo. En este punto se observa un alzado asimilable al de la figura 37, donde se ve como la pared salina alimenta el diapiro que ha nucleado. La presión que ejerce el diapiro hacia arriba deforma las capas superiores.

En el centro del perfil se ven los pliegues que genera la elevación del diapiro, el material presenta un comportamiento más bien dúctil (figura 39), no como a la derecha del modelo que se ve el ahorcamiento de la segunda pared salina generando cabalgamientos y retrocabalgamientos.

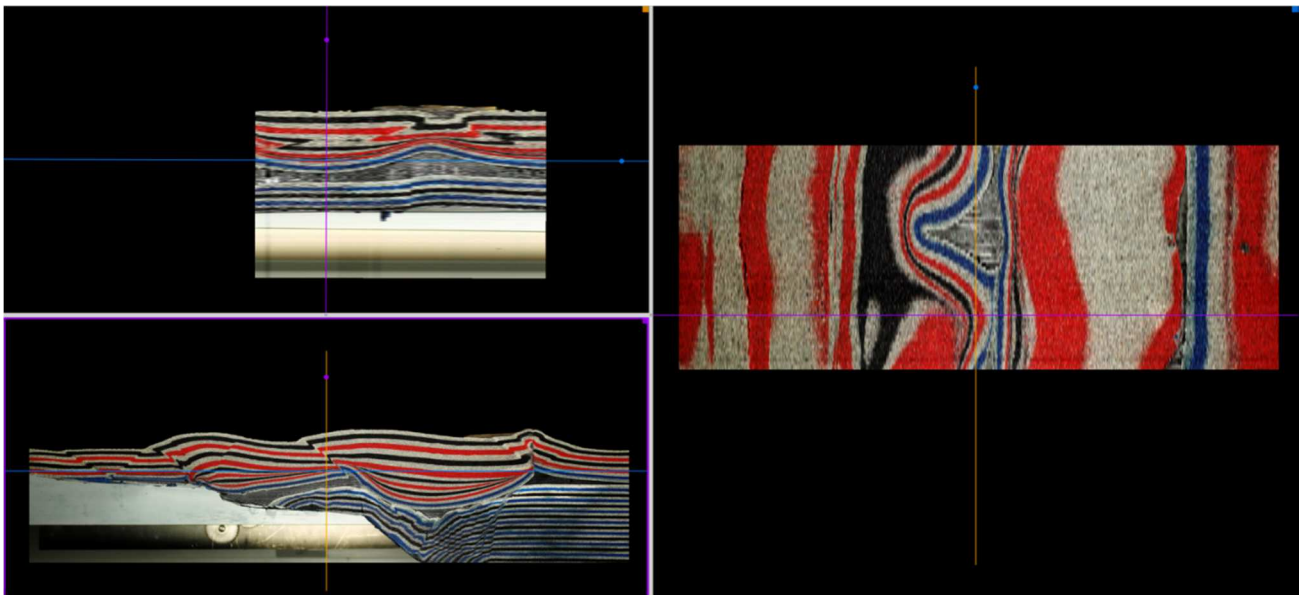


Figura 39: Alzado, planta y perfil del modelo Ex_03. Alzado situado a la altura de la primera pared salina en el que se observa como nuclea el diapiro. Planta compuesta por todas las estructuras anteriormente mencionadas. Perfil sin extrusión del diapiro, generando pliegues de acomodación a este empuje.

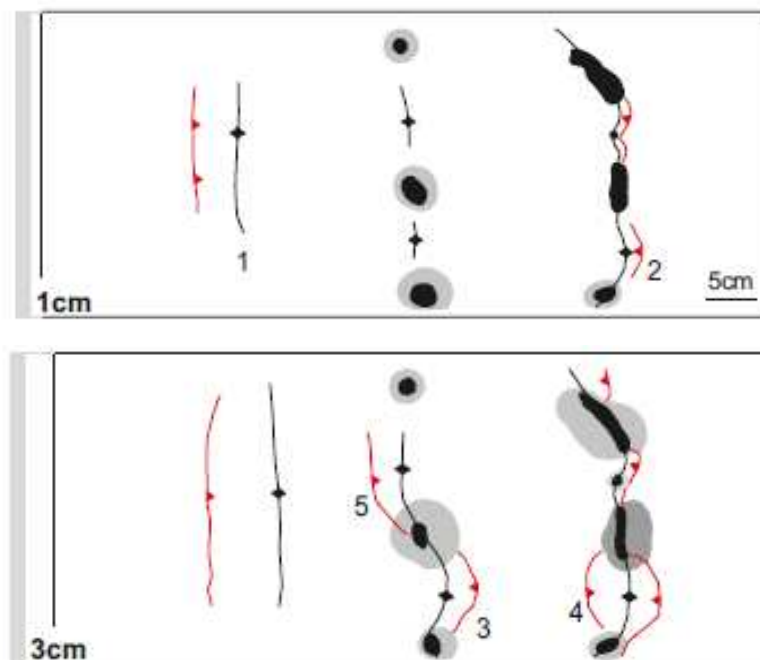
A continuación se analizará la evolución del top del modelo, para ello se ha hecho un seguimiento de las estructuras generadas a partir de la extensión aplicada.

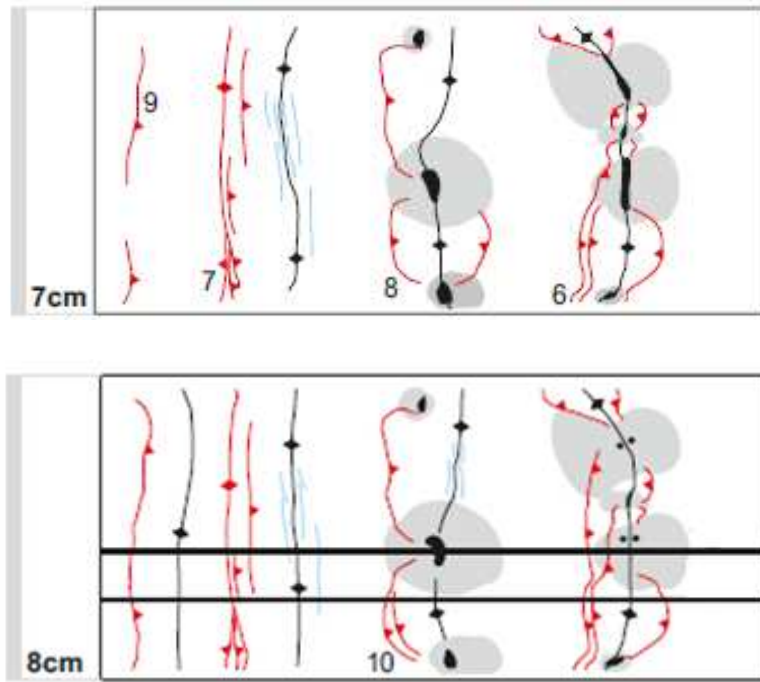
Cuando se había aplicado un total de 1 cm de extensión aparecen las primeras alteraciones en el techo, tales como el primer anticlinal asociado a la rampa superior y una pequeña falla inversa (figura 40 1), se observa la extrusión de la pared salina central y las fallas asociadas a la segunda pared salina (figura 40 2).

A los 3 cm de extensión se ve una progresión de estas estructuras ya generadas, se observa un alcance mayor de los glaciares de silicona y un aumento de la longitud de las fallas inversas.

A los 7 cm de extensión se falla considerablemente la parte izquierda del modelo aparecen los salt rollers, el semi graben y las fallas normales asociadas a la rampa superior. Aumentan el area afectada por las fallas asociadas al diapirismo y el alcance de los glaciares (figura 40 6).

A los 8 cm se observan el cabalgamiento y el retrocabalgamiento que componen el pop-up del rellano superior, aumenta a grandes rasgos el número de fallas, el alcance de los glaciares y se observan los ahorcamientos de la pared salina derecha.





Leyenda de la figura

	Anticlinal		Ahorcamientos
	Diapiro		Falla normal
	Glaciar de polímero		Falla inversa

Figura 40: Interpretación del top del modelo, representación de las estructuras más importantes generadas durante el proceso de inversión (Maria Roma 2015).

7. Casos reales

En este apartado del proyecto se pretende ilustrar las posibles aplicaciones reales de este trabajo, a continuación se mostrarán algunos ejemplos de cuencas extensivas con niveles salinos por encima de fallas de basamento.

Este apartado se puede dividir en dos secciones, la primera donde se presentarán cuencas donde sólo se ha producido extensión y un segundo apartado donde se expondrá un ejemplo de extensión más inversión.

7.1 Ejemplos reales con extensión

Al intentar interpretar cuencas con niveles evaporíticos los resultados geofísicos tienen una limitación muy importante. La presencia de evaporitas en una cuenca genera zonas de incertidumbre en la sísmica ya que absorbe gran parte de la energía sísmica disparada por la fuente. Es por este motivo que en general la calidad de los datos sísmicos debajo de cuerpos salinos es muy mala. Es por esta razón que los modelos analógicos podrían ser una muy buena aproximación para estudiar el estilo estructural sub-sal así como la evolución tectónica de la cuenca.

Los dos ejemplos reales que se han seleccionado para este apartado muestran por un lado el posible comportamiento que podrían tener los bloques pre-cinemáticos afectados por fallas de basamento y el posible comportamiento de la cobertera sin-cinemática. Esta cobertera está separada de la falla de basamento debido a la presencia de un nivel salino, que actuaría en dicho caso como un nivel de desapegue.

El primer caso real sería es del Golfo de Suez situado al este de África. En esta zona se produjo un rifting continental durante el Oligoceno y principios del Mioceno, que se prolongó hasta finales del Mioceno Inferior (Robson, 1971; Garfunkel and Bartov, 1977, Patton et al., 1994; Schütz, 1994). A finales del Mioceno tuvo lugar la sedimentación de una unidad evaporítica (formación “South Gharib”). Esta formación está compuesta por evaporitas, en concreto anhidritas (Moustafa, 1975; Brown, 1980). En la zona también hay diapirismo que hace que el grosor de la capa evaporítica llegue a los 2 km.

Debajo de esta unidad evaporítica se encuentran estratos del paleozoico, mesozoico y cenozoico. Los pliegues forzados (se denominan pliegues forzados a pliegues de propagación en base a sistemas extensivos, este tipo de pliegues están presentes en los modelos estudiados en este proyecto, justo antes de la formación del semi graben) con origen extensivo como los del

Golfo de Suez pueden presentar gran variedad de estilos de deformación (Withjack y Callaway, 2000). En general se desarrollan sobre la sal y encima de las fallas que afectan a los materiales sub-salt (Fig. 41).

Por otro lado se debe remarcar que los estratos supra salinos pertenecientes al mioceno presentan una deformación más distribuida, mimetizando la deformación inferior al nivel salino. Se pueden observar pliegues monocinales que difieren de la deformación debajo del nivel salino totalmente fallado, tal y se aprecia en la figura 41. Es por ello que se puede concluir que el nivel salino actúa como un nivel de desacople entre la deformación inferior y superior, siendo la deformación superior menor ya que el propio nivel salino absorbe gran parte de la deformación debido a su comportamiento viscoso.

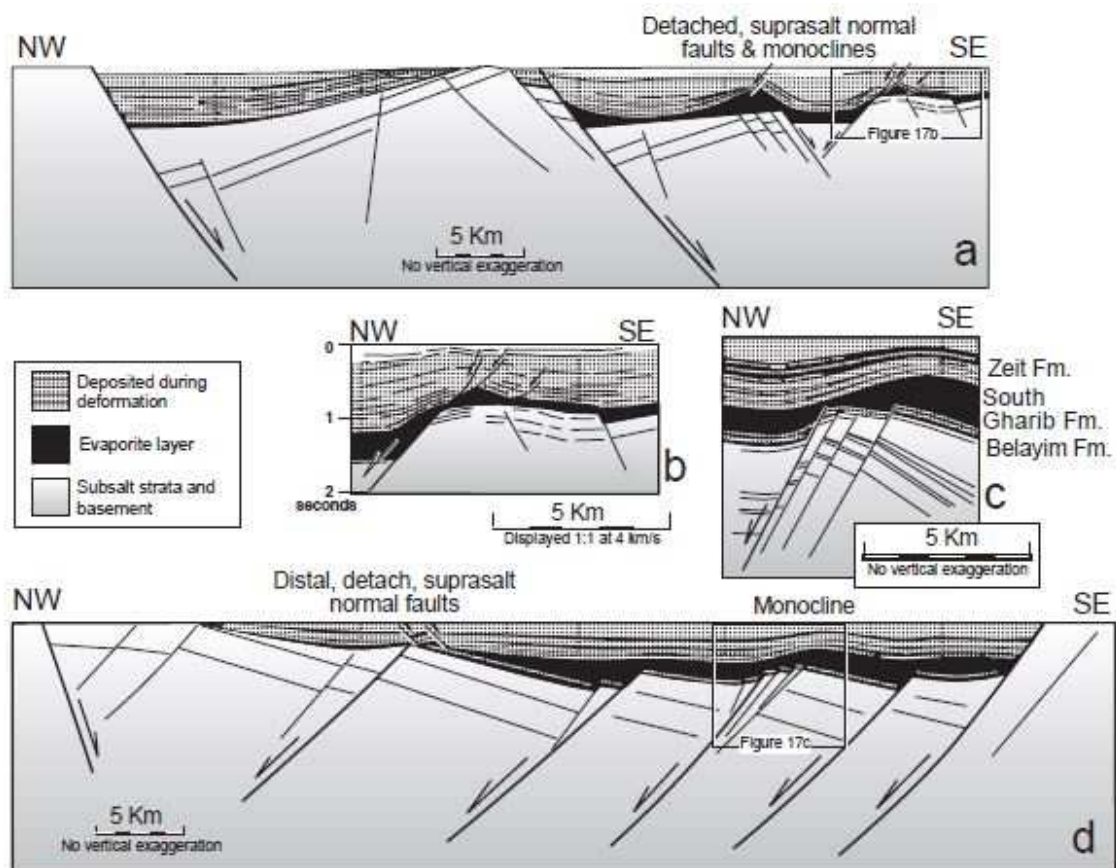


Figura 41: Secciones geológicas del rift del Golfo de Suez realizadas por (Withjack y Callaway, 2000) a partir de datos de pozo y perfiles sísmicos. Esta figura muestra claramente la diferencia entre la deformación de los estratos infra-salinos y supra-salinos. También muestra como el nivel salino ha actuado de despegue.

Por lo que respecta al segundo ejemplo de este apartado se trata de la zona de Haltenbanken en la costa de Noruega. Este área ha sido afectada por diversos episodios de extensión desde finales

del paleozoico hasta principios del cenozoico (Bukovics y Ziegler, 1985; Blystad et al., 1995) A principios del Triásico se produjo el rift, después de este periodo extensivo se depositó un nivel de evaporitas, carbones y sedimentos detríticos que produjo una paulatina subsidencia de la cuenca. Hubo una detención en el proceso extensivo a finales del Jurásico que se reactivó a principios del Cretácico, esto produjo la reactivación del rifting y a su vez la deposición de material sin-cinemático por encima de la capa de sedimentos detríticos (Bukovics y Ziegler, 1985; Blystad et al., 1995).

Como consecuencia se desarrollaron grandes pliegues forzados por extensión en las capas supra-sal, adaptándose y mimetizando las estructura de las capas infra salinas afectadas por numerosas fallas normales tal y como se muestra en la figura 42.

Al igual que para el ejemplo del Golfo de Suez, se puede concluir que el nivel salino hace la función de nivel de despegue, desacoplando la deformación infra- y supra-sal.

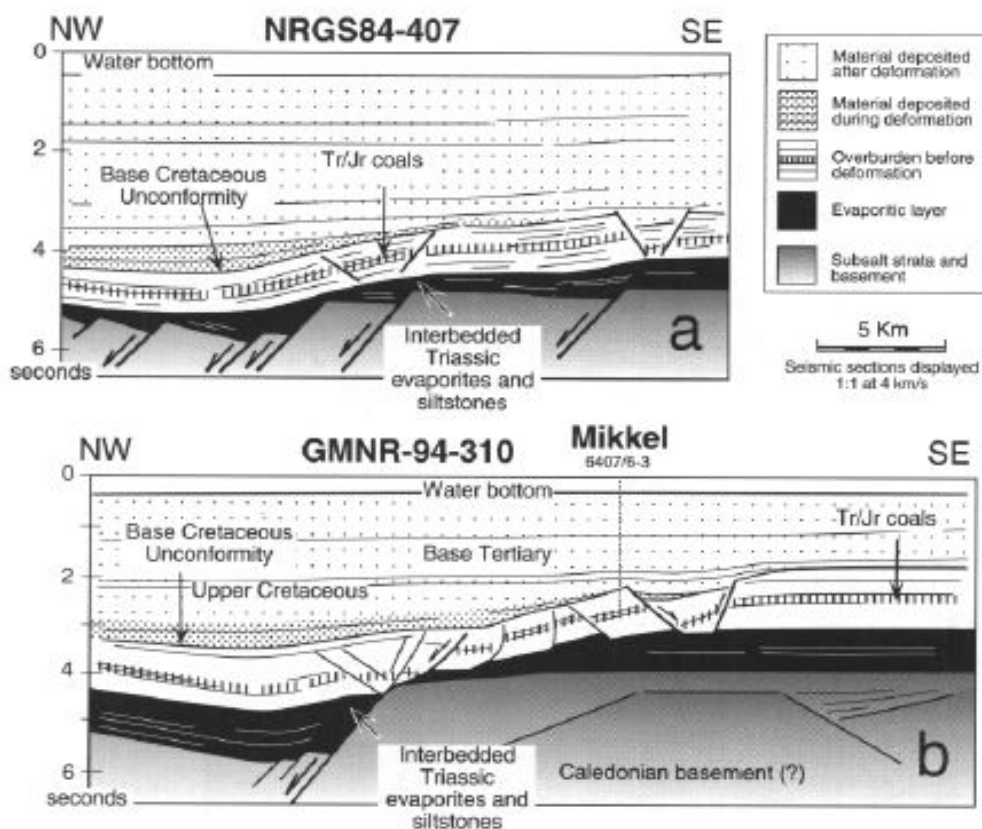


Figura 42: Cortes geológicos de la zona de Haltenbanken (Withjack y Callaway, 2000) donde se puede observar la diferencia entre la deformación producida entre los estratos superiores al nivel salino y los inferiores.

7.2 Ejemplos reales con extensión e inversión

La zona sur del Mar del Norte muestra un espectacular ejemplo de inversión positiva que ha sido ampliamente estudiada debido a su interés petrolero. En esta zona del Mar del Norte, la cuenca de Broad Fourteens, se localiza en el límite sur de la cuenca salina Pérmica. Esta cuenca muestra numerosas estructuras relacionadas con la inversión positiva, que a su vez están relacionadas con la sal presente en la zona (Zechtein salt) (Nalpas et al. 1995).

Esta capa de sal al tener un grosor inicial de más de 500m actúa como nivel de despegue tanto durante la extensión como la inversión. La capa de sal no presenta un espesor regular a lo largo de toda la cuenca, en el sector sur el espesor es mínimo y es en este punto donde se observa que la deformación del Mesozoico y del Paleozoico (unidad inferior al nivel de sal) presentan estructuras de deformación similares, figura 43.

Mientras en los casos anteriores del Golfo de Suez y de Noruega el nivel evaporítico actúa de despegue extensivo, en el caso del Broad Fourteens este actúa de detachment contractivo durante la inversión. Durante esta etapa la cuenca se levanta contractivamente mientras las fallas infra-sal se invierten (Fig. 43). Además se puede apreciar claramente estructuras contractivas a los márgenes de la cuenca para los materiales supra-sal. Estas estructuras se corresponden a pequeños cabalgamientos. De la misma forma el estilo estructural de los materiales supra-sal está dominado por pliegues de despegue de gran longitud de onda y algunas fallas normales que han sido invertidas.

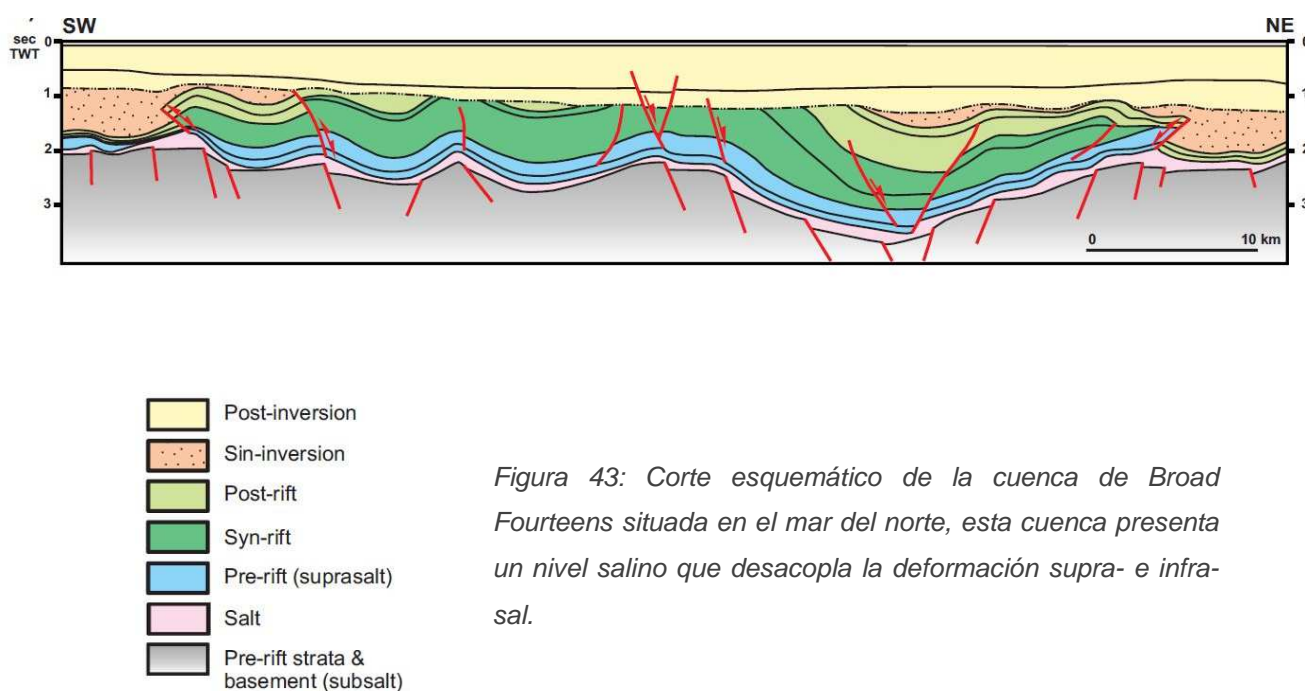


Figura 43: Corte esquemático de la cuenca de Broad Fourteens situada en el mar del norte, esta cuenca presenta un nivel salino que desacopla la deformación supra- e infra-sal.

8. Discusión y conclusiones

Las conclusiones de este proyecto de grado pueden agruparse en dos grandes unidades. Por una parte están las conclusiones metodológicas y también una serie de conclusiones más geológicas.

Conclusiones metodológicas:

La nueva aproximación realizada para el estudio de los modelos analógicos a partir de su conversión a un volumen sísmico se ha demostrado como una técnica útil para alcanzar un grado de interpretación mejor que con los métodos clásicos a partir de fotografías seriadas. Esta metodología permite tener un control mayor en la geometría 3D de las estructuras y conocer su continuidad lateral, cosa que con las fotografías seriadas clásicas es muy difícil. La modelización realizada con el software Petrel facilita la comprensión de la deformación que ha sufrido el modelo, resultando ser una herramienta que facilita la visión 3D extremadamente necesaria en el sector de la prospección de hidrocarburos.

A partir de los resultados obtenidos con el software Petrel se podrían realizar cálculos volumétricos por lo que respecta al volumen de polímero removilizado durante la deformación del modelo y conociendo el volumen inicial. Este hecho, es muy difícil de conocer en sistemas naturales en donde la mayoría de las veces se desconoce el grosor inicial de las capas evaporíticas, utilizando la mayor parte de las veces potencias estimadas. Esta cuantificación también podría resultar de gran interés en la restitución de secciones geológicas. El avance en la cuantificación a partir de la interpretación de modelos de arena podría ser una tarea futura.

Conclusiones geológicas:

La presencia de un nivel de sílica (sal en la naturaleza) influye fuertemente en el estilo estructural resultante. Así, cuando el espesor de sílica es importante, se favorece el desarrollo de pliegues en los materiales supra-sílica. Además el estilo estructural entre los materiales pre- y supra-sílica está totalmente desconectado por esta ya que absorbe gran parte de la deformación. Por este motivo mientras se desarrollan fallas normales en la unidad inferior, estas no se propagan hacia la unidad supra-sílica porque el nivel viscoso lo inhibe. En cambio, cuando escasea la cantidad de polímero el comportamiento es mucho más frágil, y las fallas de la unidad pre-sílica se pueden propagar hacia arriba más fácilmente, variando el estilo estructural de la unidad supra-sílica. Esta observación es crítica para la interpretación de datos geológicos en profundidad, donde una de las aproximaciones que se realiza es

extrapolar las observaciones que se hacen es superficial. La presencia de sal, que desacopla ambos estilos estructurales no permite hacer interpolaciones de este tipo, por lo que hay que tener especial cuidado cuando se trabaja en contextos con sal.

Si bien al plantear la inversión del modelo se pretendía llegar al punto nulo alcanzando el estadio de inversión total, se ha constatado que una vez alcanzado la misma cantidad de extensión (8cm) el modelo no alcanza la inversión total. Este hecho en parte se debe a que la silicona ha migrado y ha extruido, produciéndose una pérdida de volumen que influye en la inversión. Otro factor es que al inicio de la inversión los granos de arena deben recolocarse produciéndose una pérdida de volumen por compresión hasta que no se empiezan a deformar.

Ya sea por la calidad de los datos, el grado de deformación o la profundidad de los cuerpos geológicos que se quieren interpretar, la interpretación de casos reales es ardua y difícil. Es aquí cuando los modelos analógicos son de gran ayuda.

Los anticlinales que se forman debajo de las capas de sal podrían ser trampas de hidrocarburos. La capa de sal actuaría como sello y si se diera el caso de tener la roca reservorio justo debajo sería muy interesante poder calcular las dimensiones de ésta posible fuente mediante un modelo.

9. Agradecimientos

Debo agradecer de manera especial y sincera al Profesor Oriol Ferrer por aceptarme para realizar este proyecto final de grado bajo su dirección, de igual manera a mi cotutora Maria Roma. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido de gran importancia, no solamente en el desarrollo de este proyecto, sino también en mi formación en general. Las ideas iniciales, siempre enmarcadas por su orientación y rigurosidad, han sido clave. Le agradezco también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de este proyecto. Se agradece a Schlumberger el uso del programa Petrel como parte del acuerdo académico existente con la Facultat de Geologia de la Universitat de Barcelona. Es oportuno mencionar a Diego Ramos por su colaboración en la primera fase de la modelización con Petrel, a Andrea Pablos por su orientación y consejo y por último y no por ello menos importante a mi familia por su apoyo incondicional y a ti.

Muchas gracias.

10. Referencias bibliográficas

- Anderson, E.M.**, 1951. *The dynamics of faulting*. Hafner Pub. Co. Oliver and Boyd. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8. Págs. 387-402 doi:10.1144/transed.8.3.3871905
- Bally A.W.** 1981. *Geology of passive continental margins: history, structure and sedimentologic record (with special emphasis on the Atlantic margin)*. Tulsa, Okla.: AAPG. Education course note series, 19. ISBN 0-89181-168-0
- Blystad, P., H. Brekke, R. B. Faereth, B. T. Larsen, J. Skogseid, y B. Torudbakken**, 1995. Structural elements of the Norwegian continental shelf, part II: The Norwegian Sea Region, Norwegian Petroleum Directorate, Bulletin 8, 45 p.
- Brown RN.**, 1980. *History of Exploration and Discovery of Morgan, Ramadan and July Oilfields, Gulf of Suez*, Egypt in A.D. Miall, ed., Facts and principles of word petroleum occurrence: Canadian Society of Petroleum Geologist, Memoir 6, p.733-764.
- Bukovics, C., y P. A. Ziegler**, 1985. Tectonic development of the mid-Norway continental margin: Marine and Petroleum Geology, v. 2, p. 2-22. doi:10.1016/0264-8172(85)90045-5
- Cadell, H. M.**, 1888. - Experimental Researches in Mountain Building. . Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 35, pp 337-357. doi:10.1017/S0080456800017658.
- Cooper, M.A. y Williams, G.D.** 1989. Inversion Tectonics. Oxford [etc.]: Blackwell Scientific Publications, Geological Society Special Publication, 44. ISBN 0-632-02502-6
- Couzens-Schultz, Bruno C. Vendeville y David V. Wiltschko**, 2003. *Duplex style and triangle zone formation: insights from physical modeling*. Journal of Structural Geology Volume 25, Issue 10, October 2003, Pages 1623–1644. doi:10.1016/S0191-8141(03)00004-X
- Daubrée, A.** 1871. *Etudes synthétiques de Géologie expérimentale*. Mém. Carte géol. France.
- Einsele, G.** 2000. *Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budget*. 2ª ed. Berlin: Springer, cop. ISBN 354066193X
- Ferrer, O., Roca, E. y Vendeville, B.C.** 2014: The role of salt layers in the hangingwall deformation of kinked-planar extensional faults. Insights from 3D analogue models and comparison with the Parentis Basin. Tectonophysics, 636: 338–350. doi:10.1016/j.tecto.2014.09.013
- Ferrer, O., McClay, K. y Sellier, N.C.** 2016: *Influence of fault geometries and mechanical anisotropies on the growth and inversión of hanging-wall synclinal basins: insights from sandbox models and natural examples*. En: *The Geometry and Growth of Normal Faults* (C. Childs, R.E. Holdsworth, C.A.L. Jackson, T. Manzocchi, J.J. Walsh y G. Yielding eds.). Geological Society, London, Special Publications, 439, doi: 10.1144/SP439.8
- Garfunkel, Z.; Bartov, Y.** 1977 *The Tectonics of the Suez Rift*. Jerusalem: Geological Survey of Israel. Geological Survey of Israel Bulletin, 71.
- Gibbs, A. D.**, 1984. *Structural evolution of extensional basin margins*. *Jl. Geol. Soc. Lond.*, 141, 609-620. doi:10.1144/gsjgs.141.4.0609

Gibbs, A.D. 1984. Clyde field growth fault secondary detachment above basement faults in the North Sea. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. Tulsa, Okla.: AAPG, vol. 68, no. 8, pp. 1029-1039. ISSN 0149-1423

Gibbs, A. 1987, Development of extension and mixed-mode sedimentary basins. *Geological Society: Special Publications*. London: The Geological Society, vol. 28, pp. 19-33. ISSN 0305-8719.

Giles, K. 2012. A Halokinetic Drape-Fold Model for Caprock in Diapir-Flanking and Subsalt Positions. *Search and Discovery* [en línea]. 25 Junio 2012, article #40956. [Consulta: 15 Julio 2016]. Disponible en: <http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2012/40956giles/ndx_giles.pdf.html>

Giles & Rowan, 2012 - *Concepts in halokinetic-sequence deformation and stratigraphy* 2012. Geological Society, London, Special Publications, v. 363, p. 7-31 doi: 10.1144/SP363.2

González de Vallejo, L.I. 2002. *Ingeniería geológica*. Madrid [etc.]: Prentice Hall, cop. ISBN 8420531049

Hammerstein, J.; Truelove, L.; McClay, K.R. 2014. Additional methods for the analysis of seismic data and risk reduction through the interpretation and reservoir modelling of scaled analogue models. *Search and Discovery* [en línea]. 7 Abril 2014, article #90189. [Consulta: 15 Julio 2016]. Disponible en: <<http://www.searchanddiscovery.com/abstracts/html/2014/90189ace/abstracts/1841538.html>>

Hobbs, B.; Means, W.; Williams. 1981. *Geología Estructural*. Barcelona: Omega. ISBN 8428205698

Holdsworth, R.E.; Turner, J.P. 2002. *Extensional Tectonics: Faulting and related processes, Part 2*. London: Geological Society of London. ISBN 9781862391154

Hubbert, M.K., 1937. *Theory of scaled models as applied to the study of geological structures*. Geological Society of America Bulletin 48, 1459–1520. doi: 10.1130/GSAB-48-1459

Hudec, M.R.; Jackson, M.P.A. 2007. Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews* [en línea], Mayo 2007, vol. 82, no. 1-2, pp. 1-28. ISSN 0012-8252. doi 10.1016/j.earscirev.2007.01.001

Jackson, M.P.A.; Vendebille, B.C. 1994. Regional extension as a geologic trigger for diapirism. *Geological Society of America Bulletin*. New York: the Society, vol. 106, no. 1, p. 57-73. ISSN 0016-7606

Kehle, R. O. 1988. *The origin of salt structures*. publisher not identified.

Liesa C. L., T. Román, L. E. Arlegui, A. L. Cortés y A. Gil. 1997. *El uso de modelos experimentales en la enseñanza de geología estructural (II). Aplicación a la deformación continua*. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, (5.3) 226-234 I.S.S.N.: 1132-9157

Martínez Martínez, C. Fallas. [sitio web]. [Fecha de consulta: 27 Abril 2016]. Disponible en: <http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/GEO/tect/fallas/fallas.html>

Martínez Martínez, C. Fallas tectónicas [sitio web]. [Fecha de consulta: 27 Abril 2016]. Disponible en: http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/GEO/tect/fallas/tipos_fallas.pdf

- McClay, K.R.**, 1988. *The Mapping of Geological Structures*. Geological Society of London Handbook series, Open University Press. 164p. ISBN 0 471 932434
- McClay, K.R.** 1999. *Tectonic regimes and fault systems: structural geology for petroleum exploration*. [Short Course] London: University of London, 1999.
- McClay, K.R.** 1990. Extensional fault Systems in sedimentary basins: a review of analogue models studies. *Marine and Petroleum Geology*. Amsterdam: Elsevier, vol. 7, no. 3, p. 206-233. ISSN 0264-8172.
- McClay, K.R. y Scott, A.D.** 1991: *Hangingwall deformation in ramp-flat listric extensional fault systems*. *Tectonophysics* 188: 85-96. doi:10.1016/0040-1951(91)90316-K
- Muñoz, J.A.** *Interpretació sísmica de sistemes de falles extensives*. [presentación Power Point]. Barcelona: Universitat de Barcelona.
- Moustafa, A.M.**, 1975. *Review of diapiric salt structures, Gulf of Suez*: Proceeding of the Ninth Arab Petroleum Congress, paper103 (B3), Abu Dhabi, 15p.
- Nalpas, T., Le Douran, S., Brun, J.P., Untrnehr, P. y Richert, J.P.**, 1995. *Inversion of the Broad Fourteens Basin (offshore Netherlands), a small-scale model investigation*. *Sedimentary Geology* 95, 237–250. doi:10.1016/0037-0738(94)00113-9
- Patton, T.L.; Moustafa, A.R.; Nelson, R.A. y Abdine, S.A.** 1994. *Tectonic evolution and structural setting of the Suez rift*. En: Landon, S.M. (ed). *Interior Rift Basins*. Tulsa, Okla.: American Assoc. of Petroleum Geologists, p. 9-56. AAPG Memoir, 59. ISBN 0-89181-339-X
- Panien, M., Schreurs, G. y Pfiffner, A.**, 2006. *Mechanical behaviour of granular materials used in analogue modelling: insights from grain characterisation, ring-shear test and analogue experiments*. *Journal of Structural Geology* 28, 1710-1724. doi:10.1016/j.jsg.2006.05.004
- Pinto, L.** *Inversión tectónica* [presentación Power Point]. Chile: Universidad de Chile, [2006]. Disponible en: <https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjPt5iZ86zNAhXDrRoKHwV3Df4QFgghMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.u-cursos.cl%2Fingenieria%2F2006%2F1%2FGL55C%2F1%2Fmaterial_docente%2Fbajar%3Fid_material%3D98608&usq=AFQjCNGz7JuXABVNYqKqvrqYwi0YoSaTdg&cad=rja>
- Roberts D.G. y Bally, A.W.** 2012. *Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Rift Systems and Sedimentary Basins*. Amsterdam: Elsevier. ISBN 9780444563569
- Robson, D.A.** 1971. The Structure of the Gulf of Suez (Clysmic) rift, with special reference to the eastern side. *Journal of the Geological Society*. London: Geological Society of London, vol. 127, p. 247-276. ISSN 0016-7649
- Schellart, W.P.**, 2000. *Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling*. *Tectonophysics*, 324, pp. 1-16. doi:10.1016/S0040-1951(00)00111-6
- Schütz, K.I.**, 1994. *Structure and stratigraphy of the Gulf of Suez, Egypt*, in S.M. Landon, ed., *Interior rift basin*: AAPG Memoir 59, p.57-96.

Soto, R., Casas-Sainz, M. y Del Río, P. 2007: *Geometry of half-grabens containing a midlevel viscous décollement*. *Basin Research*, 19: 437–450. doi 10.1111/j.1365-2117.2007.00328.x

Tankard, A.J. 1995. Inversion tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and Cretaceous Basins of Southern Africa [reseña del libro *Inversion tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and Cretaceous basins of Southern Africa*: de M.J. de Wit y I.G.D. Ransome] *Tectonophysics* [en línea]. Amsterdam: Elsevier, vol. 244, no. 4, p. 285-287. [Consulta: 15 Julio 2016]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004019519590039X>> ISSN 0040-1951

Tankard, A.J. y Welsink, H.J. 1989: *Mesozoic extension and styles of basin formation in Atlantic Canada*. En *Extensional tectonics and stratigraphy of the North Atlantic margins* (A.J. Tankard y Balkwill, H.R. eds.). AAPG Memoir, 46: 175-195.

Tankard, A.J. y Welsink, H.J. 1987 Extensional tectonics and stratigraphy of Hibernia oil field, Grand Banks, Newfoundland. *AAPG Bulletin*. Tulsa, Okla.: AAPG, 1987, vol. 71, no. 10, p. 1210-1232.

Vendeville, B.C.; Mart, Y. y Vigneresse, J.L. 2000. *Salt, Shale, and Igneous Diapirs in and Around Europe*. London: Geological Society of London. Geological Society Special Edition no. 174. ISBN 9781862390669

Weijermars, R., 1986. *Flow behaviour and physical chemistry bouncing putties and related polymers in view of tectonic laboratory Applications*. *Tectonophysics*, 124, 325-358. doi:10.1016/0040-1951(86)90208-8

Withjack, M.O. y Callaway, S. 2000: *Active normal faulting beneath a salt layer: an experimental study of deformation patterns in the cover sequence*. *AAPG Bulletin*, 84 (5): 627–651.